



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA ABSORÇÃO SONORA E PERMEABILIDADE EM CONCRETOS ASFÁLTICO DRENANTES

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos exigidos pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

CÂNDIDO ALBERTO LOPES ASTRANA JÚNIOR

Florianópolis, novembro de 2006.

ESTUDO DA ABSORÇÃO SONORA E PERMEABILIDADE EM CONCRETOS ASFÁLTICO DRENANTES

CÂNDIDO ALBERTO LOPES ASTRANA JÚNIOR

**Dissertação submetida à Universidade Federal
de Santa Catarina como parte dos requisitos
exigidos pelo Programa de Pós Graduação em
Engenharia Civil para a obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Civil.**

Área de Concentração: Infra Estrutura e Gerência Viária

**Orientador: Prof. Dr. Leto Momm
Co-orientador Prof.PhD. Samir N.Y. Gerges**

Florianópolis, novembro de 2006.

ASTRANA JÚNIOR, Cândido A.L.

**ESTUDO DA ABSORÇÃO SONORA E PERMEABILIDADE
EM CONCRETOS ASFÁLTICO DRENANTES.** Florianópolis,
S.C.,2006, 138p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
Departamento de Engenharia Civil.

Orientador : Leto Momm

Co-orientador: Samir N.Y. Gerges

Defesa: 30/10/2006

1.Concretos Asfálticos drenantes 2.Absorção Sonora 3.Ruído Pneu-
pavimento. I Universidade Federal de Santa Catarina.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

CÂNDIDO ALBERTO LOPES ASTRANA JÚNIOR

**ESTUDO DA ABSORÇÃO SONORA E PERMEABILIDADE EM CONCRETOS
ASFÁLTICOS DRENANTES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Mestrado, da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, em 16 de novembro de 2006.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Leto Momm – PPGEC/UFSC
Moderador

Profa. Dra. Liedi Legi Bernucci – ESC.POLITÉCNICA/USP
Membro

Prof. PhD.Ismael Ulysséa Neto – PPGEC/UFSC
Membro

Prof. PhD. Samir N.Y.Geres – PPGEC/UFSC
Membro

Florianópolis, 16 de novembro de 2006.

Dedicatória:
À meus pais, Clessi
Astrana e Cândido
Astrana, esta conquista é
nossa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Leto Momm, pela orientação, dedicação e oportunidade de ser seu aluno. Além de Professor, grande companheiro e amigo.

Aos Professores Antônio Fortunato Marcon e Glicério Trichês pela oportunidade de poder estudar neste reconhecido Programa de Pós Graduação.

A minha noiva Cíntia Máisa Bender, pelo apoio incondicional e força nas horas difíceis.

Aos amigos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, em especial Breno Barra e Tarso Salles pela ajuda e incentivo durante o mestrado.

À Prof^{ra} Liedi Bernucci, sempre solícita a auxiliar na pesquisa e durante os ensaios no Laboratório de Tecnologia em Pavimentos, da USP.

À Edson de Moura e Erasmo, pela ajuda para a realização dos ensaios desta pesquisa.

Ao Prof. Samir Gerges, do L.V.A. da Engenharia Mecânica da UFSC, pela co-orientação durante a execução da dissertação.

A todos o meu agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA	4
1.1.1 Objetivo geral	4
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 METODOLOGIA	4
1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA	5
1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	7
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	7
CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1. FREQUÊNCIA	11
2.1.2 Circuitos de compensação sonora	14
2.1.3 Propagação do som	14
2.1.4 Outros conceitos relevantes	15
2.1.5 Materiais de absorção sonora	18
2.2 RUÍDO	20
2.2.1 Ruído gerado no contato pneu-pavimento	20
2.2.2 Geração do ruído e mecanismos de propagação resultantes da interação pneu-pavimento	21
2.2.3 Mecanismos de geração	22
2.2.4 Mecanismos que realçam o ruído gerado no contato pneu-pavimento	25
2.2.5 Mecanismos de propagação do ruído de rolagem	26
2.2.6 Fatores intervenientes na geração do ruído produzido pela rolagem dos pneus	27
2.2.7 Ruído de rolagem dos pneus relacionado ao tipo e textura do pavimento	31

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A POROSIDADE E O ATRITO.....	36
2.4 TIPOS DE SUPERFÍCIES DE RODOVIAS COM BAIXOS NÍVEIS DE RUÍDO EMITIDOS.....	38
2.4.1 Concretos asfálticos drenantes	39
2.4.1.1 Classes de concretos asfálticos drenantes.....	43
2.4.1.2 Desvantagens dos concretos asfálticos drenantes.....	44
2.4.2 Superfícies de pavimento de concreto de cimento portland não poroso.....	45
2.4.3 Pavimentos de concreto de cimento portland poroso.....	45
2.4.4 Pavimentos com superfícies emborrachadas.....	46
2.4.5 Superfícies Porosas-Emborrachadas.....	47
2.4.6 Concretos betuminosos delgados.....	48
2.4.7 Concepção de vias silenciosas.....	49
2.5 MEDIÇÕES DO RUÍDO GERADO PELO CONTATO PNEU.....	49
2.5.1 Medições no campo distante ou medições laterais dos níveis de ruído.....	50
2.5.2 Medições no campo próximo ou método de medição close-proximity.....	53
2.6 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE PAVIMENTOS.....	55
2.6.1 Medições do coeficiente de absorção sonora com o tubo de impedância ou de Kundt.....	56
2.6.2 Medições das propriedades acústicas de ondas sonoras com incidência normal in situ (“Extended Surface Method ou Método de superfície estendida).....	57
2.6.3 Medições do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante.....	58
2.6.4 “Guard Tube Method” ou Método do tubo guarda.....	58
2.7 MEDIÇÕES DOS NÍVEIS DE RUÍDO EM LABORATÓRIO COM CILINDROS DE ROLAGEM.....	61
2.8 PADRONIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO NPS E DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA.....	62
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	64
3.1 GRANULARES.....	64
3.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	65
3.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS E TEORES DE CAP DA PESQUISA.....	66
3.4 CONJUNTO DE ENSAIOS.....	69

3.4.1 Fabricação dos corpos de prova.....	69
3.4.2 Ensaio de absorção sonora nos corpos de prova de concreto asfáltico.....	75
3.4.3 Ensaio de Permeabilidade dos corpos de prova de concreto asfáltico com camada superficial drenante -Permeâmetro LCS NLT-327/88.....	85
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	87
4.1 Instrumentação e medição da absorção sonora.....	87
4.1.1 Coeficiente de absorção x Frequência.....	90
4.1.2 Função Coerência x Frequência.....	98
4.1.3 Impedância Acústica x Frequência.....	106
4.1.4 Resultados da calibração do equipamento de medição com chapa de aço.....	114
4.2 Ensaio Permabilidade – Permeâmetro LCS NLT-327/88.....	115
CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	116
5.1 Coeficiente de absorção sonora para corpos de prova com camada superficial drenante, mesmo ligante e diâmetros máximos diferentes	116
5.2 Magnitude, posição dos picos de absorção e variação do coeficiente de absorção sonora com o ligante utilizado na mistura drenante.....	122
5.3 Coeficiente de absorção sonora para o corpo de prova com camada tripla.....	124
5.4 Comparações da permeabilidade dos corpos de prova.....	126
5.5. Análise conjunta dos resultados dos ensaios de absorção sonora e permeabilidade.....	128
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	130
REFERÊNCIAS	133

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1	Fontes Urbanas de Ruído	1
Fig.2.1	Contornos padrão de audibilidade para tons puros	12
Fig. 2.2	Circuitos de compensação sonora A,B,C e D	14
Fig. 2.3	Divisão do som ao encontrar um obstáculo	15
Fig 2.4	Coefficiente de absorção em função da frequência para um pavimento drenante	16
Fig. 2.5	Contribuição das fontes de ruído do automóvel para o ruído total emitido	21
Fig. 2.6	Vibrações radiais no contato da banda de rodagem com o pavimento	23
Fig. 2.7	Bombeamento de ar na entrada e na saída da área de contato pneu-pavimento	23
Fig. 2.8	Movimentos tangenciais na área de contato pneu-pavimento	24
Fig. 2.9	Adesão na área de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento	24
Fig. 2.10	Configuração do ressonador de Hemholtz formado pela forma da área de contato pneu- pavimento	25
Fig. 2.11	Vibração da carcaça do pneu	26
Fig. 2.12	Reflexão do ruído na superfície de pavimento denso	27
Fig. 2.13	Reflexão do ruído na superfície de pavimento poroso	27
Fig. 2.14	Relação entre os coeficientes de velocidade A e B	28
Fig. 2.15	Alteração no NPS em função do carregamento	29
Fig. 2.16	Alteração no NPS emitido, devido ao torque e pressão do pneu	29
Fig 2.17	Espaçamento variável na banda de rodagem	30
Fig.2.18	Níveis de ruído de rolagem dos pneus em função de diferentes tipos de pavimentos, a 80 Km/h	32
Fig. 2.19	Faixas de valores de irregularidades e suas conseqüências para os fenômenos que ocorrem no contato pneu-pavimento	35
Fig. 2.20	Difusão dos concretos asfálticos drenantes em alguns países da Europa	41
Fig. 2.21	Técnica de texturização longitudinal em pavimentos de concreto de cimento portland utilizada nos EUA	45
Fig. 2.22	Pavimento de concreto de cimento portland poroso, detalhe da ensaio com pêndulo britânico	46
Fig. 2.23	Superfícies porosas-emborrachadas em teste na Cidade de Estocolmo, Suécia	47
Fig. 2.24	Esquema para medição com o SBP	51
Fig. 2.25	Medição de ruído de rolagem típica com o SBP	52
Fig .2.26	Medição do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento com o trailer	53

Fig. 2.27	Espectro de frequência (1/3 de oitava) obtido com a medição pelo método CPX a 72 Km/h para três diferentes tipos de camada de superfície	54
Fig. 2.28	Detalhe do posicionamento da ponta de prova para o método CPSI	55
Fig. 2.29	Esquema de medição do coeficiente de absorção sonora em laboratório	57
Fig. 2.30	Esquema de medição do coeficiente de absorção sonora in situ	58
Fig. 2.31	Esquema da medição da absorção de superfícies de pavimento com o “Guard Tube Method” (Método do tubo guarda)	59
Fig. 2.32	Execução da medição da absorção de superfícies de pavimentos com o “Guard Tube Method” (Método do tubo do guarda)	60
Fig. 2.33	Detalhe da disposição dos microfones para a medição dos níveis de ruído de rolagem emitidos, utilizando cilindro com características da superfície em campo	61
Fig. 3.1	Curva Granulométrica da misturas densas	67
Fig. 3.2	Curva Granulométrica das misturas drenantes	68
Fig. 3.3	Aquecimento do CAP e preparação do tacho misturador	70
Fig. 3.4	Aquecimento do CAP à temperatura especificada	71
Fig. 3.5	Retirada da massa de concreto asfáltico do tacho misturador	71
Fig. 3.6	Mesa compactadora LCPC	72
Fig. 3.7	Corpos de prova 1 e 2 compactados	73
Fig. 3.8	Corpo de prova 3 compactado	74
Fig. 3.9	Corpo de prova 7 compactado	74
Fig. 3.10	Ensaio de absorção sonora – detalhe da calagem do sistema de medição sobre placa de aço	75
Fig. 3.11	Esquema de montagem técnica do microfone para medição da absorção sonora	76
Fig. 3.12	Ensaio de absorção sonora - conjunto flange – tubo de impedância – caixa sonora sobre o corpo de prova	76
Fig. 3.13	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova e posição do microfone em A	79
Fig. 3.14	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova e posição do microfone em P	79
Fig. 3.15	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova primeiro ponto de medição	81
Fig. 3.16	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova segundo ponto de medição	81
Fig. 3.17	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova terceiro ponto de medição	82
Fig. 3.18	Detalhe do material vedante na área de contato flange – superfície do corpo de prova (parte inferior)	82

Fig 3.19	Detalhe do material vedante na área de contato flange – superfície do corpo de prova (parte superior)	84
Fig. 3.20	Frequências para o ensaio de absorção sonora, variação da frequência de corte com o diâmetro do tubo de impedância	84
Fig. 3.21	Frequências para o ensaio de absorção sonora, variação da frequência com a distância entre os centros dos microfones	85
Fig.3.22	Ensaio de permeabilidade sobre corpos de prova com camada superficial drenante	86
Fig. 4.1	Sistema de medição da absorção sonora - caixa acústica, gerador do sinal, amplificador de sinal, aquisitor de dados e Notebook	87
Fig. 4.2	Esquema dos pontos de medição sobre os corpos de prova	89
Fig. 4.3	Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova, posições do microfone A e P (com microfone em P)	89
Fig. 4.4	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 1	90
Fig. 4.5	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 2	91
Fig. 4.6	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 3	92
Fig. 4.7	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 4	93
Fig. 4.8	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 5	94
Fig. 4.9	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 6	95
Fig. 4.10	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 7	96
Fig. 4.11	Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 8	97
Fig. 4.12	Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 1	98
Fig. 4.13	Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 2	99
Fig. 4.14	Função Coerência (γ^2) x Frequência - Corpo de prova 3	100
Fig. 4.15	Função Coerência (γ^2) x Frequência - Corpo de prova 4	101
Fig. 4.16	Função Coerência (γ^2) x Frequência - Corpo de prova 5	102
Fig. 4.17	Função Coerência (γ^2) x Frequência - Corpo de prova 6	103
Fig. 4.18	Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 7	104
Fig. 4.19	Função Coerência (γ^2) x Frequência - Corpo de prova 8	105
Fig. 4.20	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 1	106
Fig. 4.21	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 2	107
Fig. 4.22	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 3	108
Fig. 4.23	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 4	109
Fig. 4.24	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 5	110
Fig. 4.25	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 6	111

Fig. 4.26	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 7	112
Fig. 4.27	Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 8	113
Fig. 4.28	Resultados da caracterização acústica de uma chapa de aço	114
Fig. 5.1	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2 e 5, primeiro máximo de absorção	116
Fig. 5.2	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2 e 5, segundo máximo de absorção	117
Fig. 5.3	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2 e 5, na faixa de frequência de 1000 Hz	118
Fig. 5.4	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 3 e 6, primeiro máximo de absorção	119
Fig. 5.5	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 3 e 6, segundo máximo de absorção	119
Fig. 5.6	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 3 e 6, na faixa de frequência de 1000 Hz	120
Fig. 5.7	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, primeiro máximo de absorção	121
Fig. 5.8	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, segundo máximo de absorção	121
Fig. 5.9	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, na faixa de frequência de 1000 Hz	122
Fig. 5.10	Comparação do coeficiente de absorção sonora máximo, todos corpos de prova	124
Fig. 5.11	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2,3,4 e 8, primeiro máximo de absorção	125
Fig. 5.12	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2,3,4 e 8, segundo máximo de absorção	125
Fig. 5.13	Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2,3,4 e 8, na faixa de frequência de 1000 Hz	126
Fig.5.14	Permeabilidade dos corpos de prova 2,3,4 e 8	127
Fig. 5.15	Permeabilidade dos corpos de prova 5,6 e 7	127
Fig. 5.16	Permeabilidade média de todos corpos de prova com camada superficial drenante	128
Fig. 5.17	Coeficiente de absorção sonora de todos corpos de prova com camada superficial drenante, na faixa de frequência de 1000Hz	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Níveis de pressão sonora de fontes comuns	10
Tabela 2.2	Bandas centrais para oitavas de banda e um terço de oitava de banda e fatores de atenuação da percepção auditiva para a escala A	13
Tabela 2.3	Atenuação na transmissão de som em função do tipo e espessura do material	17
Tabela 2.4	Mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento	22
Tabela 2.5	Composições típicas de concretos asfálticos drenantes de alguns países europeus	40
Tabela 3.1	Características do CAP modificado por polímero SBS	65
Tabela 3.2	Características do CAP modificado por borracha moída de pneu (15 %)	66
Tabela 3.3	Características do CAP 50-70	66
Tabela 3.4	Granulometrias das misturas de concreto asfáltico denso	67
Tabela 3.5	Granulometrias das misturas de concreto asfáltico drenante	68
Tabela 3.6	Corpos de prova de concreto asfáltico fabricados, espessuras das camadas e materiais de mistura	73
Tabela 4.1	Lista de equipamentos utilizados no ensaio de absorção sonora	88
Tabela 4.2	Resultados do ensaio de permeabilidade para os corpos de prova com camada superficial drenante	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIPCR: ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRES DE LA
ROUTE

AFNOR: ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION

BBM: Béton Bitumineux Mince

BBTM: Béton Bitumineux Très Mince

BBUM: Béton Bitumineux Ultra- Mince

CAP: Cimento asfáltico de petróleo

CPSI: Close proximity sound intensity

CPX: método close-proximity

CPXI: Close Proximity Index

dB: Decibel

EPUSP: ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Leq: Nível sonoro equivalente

LTP: LABORATÓRIO DE TÉCNICAS DE PAVIMENTAÇÃO

LVA: LABORATÓRIO DE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA

MTD: profundidade média do perfil longitudinal

NPS: Nível de pressão sonora

PERS: Superfícies poro-elásticas

SBP: Statistical by-pass

SBPI: Statistical by-pass index

SLM: Medidor de nível sonoro

SMA: Stone matrix asphalt

SMTP: sensor de medida profundidade de textura

RESUMO

No presente trabalho foram avaliadas, em laboratório, as características de absorção sonora de corpos de prova de concreto asfáltico com camada superficial drenante e densa. Objetiva-se com este estudo determinar o coeficiente de absorção sonora e características de permeabilidade das misturas executadas. Os corpos de prova foram fabricados com materiais granulares de mesma origem. As amostras com camada superficial drenante analisadas possuem granulometrias com diâmetros máximos diferentes, a saber, 12,5 e 9,5 mm. No processo de mistura dos corpos de prova fabricados, utilizaram-se ligantes modificados com dois diferentes materiais: o asfalto modificado por borracha e o polímero SBS, para as misturas drenantes, e ligante comum de cimento asfáltico de petróleo 50 – 70, para as misturas densas. Após o processo de fabricação dos corpos de prova, verificou-se o comportamento acústico dos mesmos, utilizando um sistema de medição em laboratório com o tubo de impedância, montado verticalmente sobre a superfície dos corpos de prova. Os dados dos resultados dos ensaios de absorção sonora foram então compilados com o auxílio do software Matlab, através de um programa que utiliza o método de função de transferência para este fim. Este programa forneceu os espectros de absorção sonora com a frequência, função coerência com a frequência, e impedância acústica normalizada com a frequência. Pôde-se então verificar as tendências de comportamento da absorção sonora dos corpos de prova, comparando-os dentro de grupos com mesmo tamanho máximo de agregados e diferentes materiais de mistura, e ainda dentro de grupos com diferentes tamanhos máximos de agregado e diferentes materiais de mistura. Além disso, os corpos de prova foram analisados quanto ao coeficiente de absorção sonora na faixa de frequência mais problemática com relação à emissão de ruídos emitidos por veículos automotores. Ainda verificou-se, neste trabalho, a permeabilidade dos corpos de prova de concreto asfáltico com camada superficial drenante, e aspectos ligados à porosidade destas camadas. Conclui-se após análise dos resultados dos ensaios, que para todos os corpos de prova com camada superficial drenante o coeficiente de absorção sonora é maior quando comparado ao corpo de prova com camada superficial densa, independentemente do tipo dos materiais de mistura e granulometrias estudadas. Além disso, observou-se que as diferenças maiores quanto ao comportamento à absorção sonora foi mais diferenciado na faixa de frequência de 1000Hz e em frequências superiores a 1000Hz. Os resultados dos ensaios de permeabilidade executados levaram a inferir que corpos de prova com granulares com diâmetros máximos maiores nas camadas drenantes possuem maiores velocidades de percolação.

Palavras-chave: concreto asfáltico drenante, absorção sonora, ruído pneu-pavimento.

ABSTRACT

In the present work were evaluated, in laboratory, the characteristics of sound absorption of asphalt concrete samples with porous and dense layers. The samples were manufactured with granular stuff of same origin. The porous layers analyzed have different maximum size concerning to its granulometries, such as 12,5mm and 9,5mm. During the mixing process of the manufactured samples, they were used modified asphalt cements comprising two different stuffs: rubber and the polymer SBS, for the porous mixes, and asphalt cement in original conditions named 50-70, for the dense mixes. After the process of manufacturing samples, it was verified the acoustic behaviour of them, using a system of measurement in laboratory consisting of an impedance tube placed vertically on the surface of the samples. Then, the sound absorption data obtained were compiled with the aid of the software Matlab, through a program that uses the transference function method to realize this procedure. This program supplied the sound absorption spectra with the frequency, function coherence with the frequency, and acoustic impedance standardized with the frequency. It was possible to verify the behaviour trends of the sound absorption relationed to the samples, comparing these data within groups as with the same aggregate maximum size as with different stuffs concerning to the composition of the mixes, and still within groups as with different aggregate maximum sizes and as with different stuffs concerning to the composition of the mixes. Besides, the samples were analyzed taking into account the coefficient of sound absorption in the more problematic frequency considering the emission of noises produced by the automobiles. It was also verified the permeability of asphalt concrete samples with porous surface and the relation of this aspect to the porosity of its surfaces. It can be concluded after the results of the tests that for all specimens with porous layer, the coefficient of sound absorption is higher when compared to the specimens with dense layer, independently of the type of the material concerning to the mix and granulometry researched. Besides, they were verified that the higher differences relationed to the sound absorption behaviour were more intense in the frequency band of 1000Hz and for frequencies higher than 1000Hz. The results of the permeability tests executed led to conclude that the specimens with grains which have the biggest maximum diameters in the porous layers present higher speeds of water flow.

Key Words: porous surface, sound absorption , pavement-tire noise

CAPÍTULO 1. - INTRODUÇÃO

O ruído é atualmente um forte tipo de poluição ambiental, atingindo diretamente um número cada vez maior de pessoas em todo o mundo. Na maioria das situações, o ruído gerado pelo tráfego é considerado o maior contribuinte com relação ao ruído total, afetando as populações de zonas urbanas e de regiões próximas às rodovias. A figura 1.1 ilustra a percentagem de contribuição de diferentes fontes sonoras para o ruído urbano na cidade de Londres (JONES, 2004).

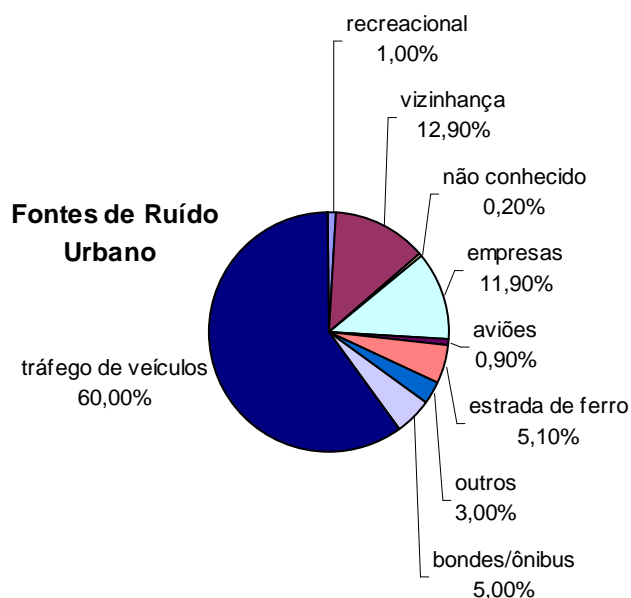


Figura 1.1 – Fontes Urbanas de Ruído (JONES, 2004).

Estudos referentes à emissão de ruído por veículos são escassos antes da década de setenta. A verificação por parte dos fabricantes de automóveis, e de centros de pesquisa a respeito deste tema inicia-se ao final desta década, com a implementação de estudos e apresentação de trabalhos em congressos na Europa e Estados Unidos da América.

A partir de 1989, com o congresso mundial sobre poluição sonora realizado na Suécia, a questão do ruído passou a ser considerado assunto de saúde pública pela Organização Mundial de Saúde, face ao crescimento exacerbado dos níveis de ruído em escala mundial.

Atualmente o Brasil é considerado, um país com níveis de ruído muitíssimo elevado, cidades como São Paulo e Rio de Janeiro, por exemplo, estão entre as cinco cidades com maiores níveis de ruído no mundo. Estas cidades possuem locais considerados críticos onde alcançam picos de emissão de ruído da ordem de 95 dB (**FERNANDES, 2002**).

Cidades brasileiras, consideradas médias, já experimentam o aumento dos níveis de ruído de forma preocupante. Em estudo recente realizado em Florianópolis, pelo Núcleo de Prevenção de Acidentes da UFSC, verificou-se que em alguns trechos da cidade os níveis de ruído já estão em torno de 80 a 85 dB, principalmente as margens de vias de tráfego consideradas de maior fluxo de veículos.

Podem também ser citadas como indicadores dos problemas ocasionados pelo ruído gerado pelo tráfego, as pesquisas sociais e registros de reclamações a autoridades governamentais que freqüentemente ocorrem em grandes e médias cidades.

Outro aspecto a ser considerado são os malefícios da exposição do ser humano ao ruído do tráfego. De uma forma geral, estes malefícios são resultado da interação de variáveis psicológicas e ambientais, e podem ser divididos de duas formas distintas (**MARTIMPORTUGUÉS et al, 2003**):

- Atuando sobre a audição;
- Atuando sobre o bem-estar dos cidadãos.

Do ponto de vista econômico, o aumento dos níveis de ruído gerado pelo tráfego tem levado a uma crescente desvalorização de centros urbanos. Outro aspecto a ser considerado, é estagnação da expansão econômica que acontece quando determinada população resiste ao incremento de capacidade de uma via, devido a um futuro aumento nos níveis de ruído, na via a ser ampliada ou construída. Este aspecto é verificado mais corriqueiramente em países desenvolvidos durante processos de expansão viária.

Podem-se citar os programas nacionais para redução do ruído advindo do tráfego como medidas para regulamentar os níveis máximos permitidos de ruído as margens de vias. Estes programas foram implementados em alguns estados dos Estados Unidos da América, países como o Japão e países da Comunidade Européia como França, Inglaterra, Suécia, etc...A partir da década de 90.

As medidas utilizadas nos programas de redução do ruído do tráfego, além de delimitar os níveis máximos de ruído, também buscam colocar em prática, soluções que possam ser implantadas em vias de tráfego geradoras do ruído. Dentre estas medidas pode-se destacar:

- Implantação de barreiras acústicas e
- Aprimoramento e busca de pavimentos rodoviários ou urbanos, que além de exercer sua função estrutural e funcional, possibilitem diminuição do ruído gerado pela rolagem dos pneus.

Ressalta-se no presente trabalho, a propriedade dos concretos asfálticos drenantes no que diz respeito a sua capacidade de absorção sonora, quando comparados aos pavimentos tradicionalmente executados em nosso país.

Conhecido o problema e suas implicações à sociedade, seja pelos problemas gerados ao bem-estar e saúde dos cidadãos, pelos problemas gerados pela minoração do valor econômico às propriedades e seja pelo problema do impacto ambiental produzido por emissões cada vez maiores de ruído gerado pelo tráfego, buscar-se-á no presente trabalho o entendimento da fenomenologia do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento. Além disso, propõe-se caracterizar os concretos asfálticos drenantes acusticamente, visando sua utilização como medida redutora deste tipo de ruído.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal proposto é a determinação dos coeficientes de absorção sonora de misturas de concreto asfáltico drenante em função da frequência, para balizar sua aplicabilidade como medida redutora do ruído proveniente da rolagem dos pneus em contato com a superfície do pavimento.

Pode-se definir este objetivo, desta forma:

“Caracterizar acusticamente as misturas de concreto asfáltico drenante, através de seu coeficiente de absorção sonora, evidenciando as propriedades deste tipo de mistura, que contribuem para a diminuição do ruído gerado no contato pneu superfície do pavimento”.

1.1.2 Objetivos específicos

- Fabricar corpos de prova de concreto asfáltico (camadas duplas e tripla) com camadas de superfície drenante na mesa compactadora LCPC;
- Realizar o ensaio de absorção sonora em todos os corpos de prova fabricados verificando as tendências de comportamento a absorção sonora destes corpos de prova;
- Definir a maior ou menor adequabilidade das misturas executadas, quando da utilização de diferentes materiais e granulometrias para a sua composição, na utilização das mesmas como camada de superfície de rolamento e que efetivamente possuam melhores propriedades na mitigação do ruído produzido pela rolagem dos pneus;
- Definir o comportamento dos corpos de prova fabricados quanto à permeabilidade.

1.2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo dos concretos asfálticos em laboratório, procedeu-se inicialmente à seleção dos materiais a serem utilizados para a confecção dos corpos de prova de concreto asfáltico, foram selecionados materiais granulares (brita e pó de pedra) advindos de jazida da região da grande Florianópolis, e foram realizados os ensaios de caracterização dos

mesmos. Os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) utilizados foram adquiridos junto às refinarias de asfalto e estas empresas realizaram os estudos de caracterização destes produtos.

Após a verificação das propriedades dos materiais selecionados buscou-se na literatura técnicas e parâmetros que pudessem nortear a formulação das curvas granulométricas e dos teores de CAP a serem utilizados em laboratório. Desta forma foram selecionados trabalhos já referenciados para compor as curvas granulométricas e teores de CAP a serem utilizados nos concretos asfálticos produzidos e ensaiados em laboratório. O critério para estas escolhas obedeceu ao princípio de que a formulação das misturas deveria ter um bom desempenho mecânico já comprovado em laboratório. Com isso utilizaram-se os trabalhos de Meurer Filho (2001) e Momm (1998) como referência para a execução das misturas asfálticas.

Para a avaliação das misturas asfálticas quanto à absorção sonora, buscou-se na literatura o entendimento da fenomenologia do processo de geração do ruído produzido pelo contato pneu-pavimento, utilização de técnicas construtivas e que são utilizadas para a diminuição deste problema, e formas de verificação das propriedades acústicas de pavimentos.

Os ensaios realizados para avaliação do comportamento quanto à absorção sonora dos corpos de prova de concreto asfáltico deste trabalho, baseou-se na disponibilidade dos equipamentos junto às instituições de ensino que se propuseram a colaborar na execução desta pesquisa, desta forma a fabricação dos corpos de prova de concreto asfáltico foi realizada no Laboratório de Técnicas de Pavimentação (LTP) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) e os ensaios de permeabilidade e absorção sonora foram realizados nos Laboratórios de Pavimentação e Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal de Santa Catarina.

Com o término dos ensaios de laboratório e obtenção dos resultados, foram efetuadas as análises e discussões, chegando então às conclusões deste trabalho.

1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA

A importância da pesquisa se justifica pela busca da utilização de materiais a serem utilizados na pavimentação, que possuam boas características de absorção sonora com vistas a diminuir as

emissões de ruído de rolagem. Seria preferível não produzir o ruído durante a rolagem dos pneus, como isso é impossível, há que se buscar a mitigação deste ruído através de superfícies mais absorventes acusticamente.

Os concretos asfálticos drenantes, são aqueles concretos asfálticos que possuem alta percentagem de vazios e cuja forma dos vazios é tal que as águas da chuva circulam entre os mesmos. Além das propriedades de melhoria da segurança e aumento do conforto ao dirigir é também chamado de pavimento silencioso. Além disso, outros aspectos podem ser considerados para ressaltar a importância deste estudo, como será verificado nas afirmações a seguir.

O Brasil é um país que possui um sistema de transporte público deficiente, desta forma as populações nas grandes e médias cidades encontram na aquisição e utilização de veículos particulares a solução para seu problema de transporte seja para pequenas, médias e grandes distâncias. Com isso, tem aumentado significativamente o impacto ambiental do ruído gerado pelos veículos automotores em centros urbanos e regiões próximas a vias de tráfego. O estudo deste problema, com a busca de soluções que visem minorar o impacto ambiental causado pela poluição sonora advinda do tráfego pode auxiliar na divulgação de técnicas e mecanismos que possam ter aplicações de ordem prática para a redução deste tipo de ruído em nosso país.

Verifica-se atualmente em centros urbanos com níveis altíssimos de poluição sonora, a crescente perda de valor imobiliário destas regiões. Um exemplo deste problema é constatado na cidade de São Paulo, onde zonas centrais estão sendo literalmente abandonadas pelo fato das mesmas apresentarem níveis de ruído muito acima do permitido para aquelas regiões. Portanto a compreensão deste fenômeno pode vir a auxiliar na recuperação destas áreas. Outro aspecto é o que afeta economicamente determinadas regiões através da diminuição dos valores imobiliários. Na concepção e construção de novas vias, não se insere no projeto de impacto ambiental, a consideração a respeito do ruído futuro a ser gerado por esta nova via.

O nível de desenvolvimento de país pode ser verificado através da efetividade do seu sistema de transporte, não apenas com relação ao estado físico de suas vias, mas também através da

capacidade das mesmas em propiciar conforto ambiental a seus usuários e a populações indiretamente atingidas por este sistema de transporte.

Constata-se que em nosso país existe carência de bibliografias a respeito do tema proposto, desta forma a pesquisa em curso poderá vir a contribuir para uma maior divulgação do referido problema no meio acadêmico.

Por fim é necessário assegurar tanto ao usuário das vias em nosso país e as comunidades vizinhas a estas vias, um sistema viário que englobe qualidade técnica e que esteja inserido de forma coerente numa proposta de melhoria de qualidade de vida para todos os cidadãos. Portanto é necessário e torna-se urgente o estudo, entendimento e aplicação dos conhecimentos a respeito de soluções e mecanismos que venham a mitigar o ruído advindo do tráfego de veículos, mais especificamente do ruído gerado pela rolagem dos pneus.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa limita-se ao estudo em laboratório das características de absorção sonora de sete corpos de prova de concreto asfáltico com camada de superfície drenante e um corpo de prova de concreto asfáltico com camada de superfície densa, utilizando materiais da região da grande Florianópolis. Além da absorção é executada em laboratório a permeabilidade dos corpos de prova de concreto asfáltico com camada de superfície drenante.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

O primeiro capítulo situa a questão do ruído gerado pelo tráfego, como problema ambiental nos centros urbanos e em zonas próximas as rodovias, definem-se também os objetivos do trabalho e os procedimentos para alcançar tais objetivos.

O segundo capítulo é uma revisão bibliográfica dos conceitos relativos à ocorrência ao ruído de uma forma geral, conceitos sobre ruído e som, grandezas acústicas, formas de geração,

propagação e absorção do ruído, mais especificamente do ruído gerado pela rolagem dos pneus na superfície do pavimento, além disso, faz-se uma revisão da literatura sobre os tipos de soluções utilizadas atualmente na construção de pavimentos para combater o problema do ruído e formas de verificação do mesmo.

No terceiro capítulo são descritos os materiais utilizados na pesquisa e os procedimentos de laboratório realizados durante a mesma.

No quarto capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados, e no quinto capítulo segue-se à análise e discussão destes resultados. No sexto capítulo, são apresentadas às conclusões relevantes sobre o estudo. Também no sexto capítulo são apresentadas sugestões para continuidade desta pesquisa.

CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA

O som é definido como um fenômeno vibratório que é resultado das variações de pressão no ar. Também, toda a superfície vibrante pode criar o som, esteja esta superfície funcionando como um alto-falante ou gerando o som por processos aerodinâmicos. Fontes vibrantes são citadas como uma fonte mecânica de som. Por exemplo, no pneu, a banda de rodagem e a carcaça vibram quando em contato com a superfície do pavimento gerando desta forma o som, estas vibrações também são passadas a roda, ao corpo de veículo e outras estruturas que vibram em uma vasta gama de frequências audíveis, criando assim radiação sonora adicional.

O ouvido humano pode perceber uma considerável variação de pressões do ar, percebidas através da frequência e ruidosidade¹ (loudness). O som pode ser descrito dessa forma pela ruidosidade ou intensidade e frequência. A intensidade do som é relacionado diretamente com a amplitude de flutuação da pressão sonora transmitida pelo ar ou outro meio, e recebido pelo ouvido humano (GERGES, 1992).

A sensação da audição é criada quando ocorrem pequenas flutuações de pressão do ar em torno da pressão atmosférica e estas pressões se transmitem pelo ar (ou outro meio) na forma de ondas sonoras, flexionando o tímpano humano criando aí a sensação do som em nosso sistema auditivo.

Para uma pessoa com boa audição a faixa de valores de pressão sonora sensível ao ouvido fica entre 20 μ Pa e 63 Pa. O som mais “fraco” que um ouvido humano sadio pode detectar é de 20 μ Pa, que é aproximadamente cinco bilhões de vezes menor que a pressão atmosférica. Para se evitar ter que trabalhar com valores de nível de pressão sonora não manejáveis matematicamente e pelo fato que a resposta humana a sensação auditiva não é linear, mas sim logarítmica a escala decibel² é utilizada.

¹ Ruidosidade (Loudness) é definida como a medida psicoacústica que reflete a percepção humana da energia contida em um ruído e que é representativa do som.

² Em 1924, um grupo de engenheiros que trabalhavam nos laboratórios da empresa Bel Telefones, desenvolveu a medida de escala que ajudou o mundo a quantificar o som, foi dado a esta unidade o nome de Bel, em homenagem ao fundador da empresa e pioneiro das telecomunicações Alexander Graham Bell.

A escala decibel é aceita internacionalmente para descrever as flutuações de pressão. Sendo o decibel (dB) expresso pelo termo nível de pressão sonora (NPS) e é fornecido pela equação:

$$\text{NPS(dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P^2}{P_0^2} \right) \quad (2.1)$$

Onde P é a pressão sonora considerada e P_0 é a pressão sonora de referência, com valor igual a 2×10^{-5} Pa.

Os valores de pressão sonora de 20 μPa e 63 Pa correspondem aos valores de 0 e 130 dB respectivamente, o valor de 130 dB é o valor do limiar da dor para a audição humana. A tabela 2.1 apresenta os níveis de pressão sonora de fontes sonoras comuns.

Tabela 2.1. – Níveis de pressão sonora de fontes comuns (SANDBERG, 2002).

Efeitos	Fonte Sonora	Nível de Pressão Sonora (μPa)	Nível de Pressão Sonora (dB)
Sérios danos à audição	Lançamento de foguete (na vizinhança ao lançamento)	200.000.000	140
Danos à audição e dor	Motor de jato (25 m de distância)	63.245.555	130
Danos à audição após longa exposição	Alarme de ataque aéreo (5m)	20.000.000	120
Perigo de danos à audição	Show de rock em local fechado	6.324.555	110
Perigo a audição	Decolagem de um jato (300m)	2.000.000	100
Algum perigo a audição	Ruído industrial	632.456	90
Efeitos a saúde	Caminhão a 70Km/h (10 m)	200.000	80

Efeitos	Fonte Sonora	Nível de Pressão Sonora (μPa)	Nível de Pressão Sonora (dB)
Alguns efeitos a saúde Incômodo severo	Carro a 60 Km/h (10m)	63.246	70
Incômodo	Conversação normal a 1m de distância	20.000	60
Alguma incomodação	Conversação baixa a 1m de distância	6.325	50
Ambiente agradável	Música de rádio	2.000	40
	Sussurar	632	30
	Quarto silencioso	200	20
	Balançar de folhas	63	10
Silêncio desconfortável	Câmara anecóica para medição do ruído	20	0

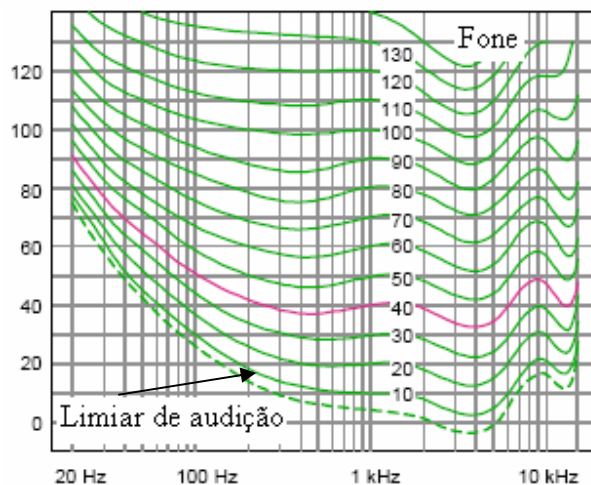
2.1. FREQUÊNCIA

O ouvido humano pode perceber uma larga faixa de valores de frequência, sendo a frequência definida como a taxa de ocorrência da flutuação completa de pressão e dado pelo número de ciclos por segundo. A frequência possui como unidade o Hertz (Hz). Uma pessoa com boa audição consegue perceber sons com valores de frequência de 20 Hz até 20 KHz. (**BRUEL e KJAER, 2000**).

A frequência é a componente do som que fornece a qualidade do tom do som (ou qualidade tonal). Um som com apenas uma frequência é chamado de um tom puro, mas é raramente encontrado na prática. O ruído de uma forma geral encontra-se numa banda larga de frequências.

A diferença de sensibilidade para diferentes frequências é mais pronunciada para baixos NPSs (níveis de pressão sonora) do que para altos NPSs, como mostra a figura 2.1.

Nível de
pressão
Sonora (dB)



Frequência (Hz)

Figura 2.1 – Contornos padrão de audibilidade para tons puros (BRUEL e KJAER, 1998).

Outro importante parâmetro que caracteriza o som é o comprimento de onda, definido como a distância entre picos consecutivos de pressão acústica (forma senoidal) para uma dada frequência, e é definido pela equação:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

Onde c é a velocidade do som no ar a 20°C com o valor de 343 m/s e f é a frequência do som.

Como verificado anteriormente, na faixa audível, o ouvido humano percebe a frequência de forma não linear. Estudos a este respeito mostram que o ouvido humano obedece a Lei de Weber³ de estímulo e sensação, que, aplicado à acústica, mostra que a sensação auditiva varia de acordo com o logaritmo dos estímulos que a produzem. Desta forma, os intervalos de som entre 100 e 200 Hz, 200 e 400 Hz e 400 e 800 Hz parecerão iguais a nossos ouvidos. Com isso o intervalo entre frequências não se mede pela diferença de frequência, mas pela relação entre as mesmas. Defini-se, então, uma oitava como sendo o intervalo entre frequências cuja relação é igual a dois (FERNANDES, 2002).

³Lei de Weber é a relação entre intensidade física de uma excitação e a intensidade subjetiva da sensação de uma pessoa. Para a acústica significa que para sons de mesmas frequências a intensidade da sensação sonora cresce proporcionalmente ao logaritmo da intensidade física.

$$\frac{200}{100} = \frac{400}{200} = \frac{800}{400} = 2 \rightarrow 1 \text{ oitava}$$

Na análise de dados acústicos a frequência é expressa em termos de oitavas de banda ou um terço de oitava de banda. A tabela 2.2 a seguir mostra as frequências centrais dessas bandas, onde cada oitava ou um terço de oitava de banda do NPS representa a energia acústica em cada frequência de banda.

Tabela 2.2. - Bandas centrais para oitavas de banda e um terço de oitava de banda e fatores de atenuação da percepção auditiva para a escala A.

Frequência central da banda de oitava (Hz)	Frequência de 1/3 da banda de oitava (Hz)	Atenuação da percepção auditiva para a escala A (dB)
25		-44,7
31,5	31,5	-39,4
40		-34,6
50		-30,2
63	63	-26,2
80		-22,5
100		-19,1
125	125	-16,1
160		-13,4
200		-10,9
250	250	-8,6
315		-6,6
400		-4,8
500	500	-3,2
630		-1,9
800		-0,8
1000	1000	0
1250		0,6
1600		1
2000	2000	1,2
2500		1,3
3150		1,2
4000	4000	1
5000		0,5

2.1.2 Circuitos de compensação sonora – circuitos A,B,C e D

O ouvido humano não é igualmente sensível a todas as frequências, sendo mais sensível entre 2 à 5 KHz e menos sensível a frequências extremas, sejam altas ou baixas. Este fenômeno é mais pronunciado para baixos NPSs (níveis de pressão sonora) do que para altos.

Circuitos eletrônicos de sensibilidade variável com a frequência, feitos para modelar o comportamento do ouvido humano, são padronizados e classificados como A,B,C e D. O circuito A aproxima-se das curvas de igual audibilidade para baixos NPSs, os circuitos B e C são análogos ao circuito A, porém para médios e altos NPSs respectivamente. Para utilização prática, usa-se o circuito A, pois é o que fornece melhor correlação em testes subjetivos, do que os circuitos B, C e D, portanto ao “medirmos” um determinado ruído em escala dB (A), significa que o nível de ruído é reconhecido por um microfone que o filtra e o ajusta de maneira que mais se assemelha ao ouvido humano. A curva de compensação D, foi padronizada para medir ruídos em aeroportos. A figura 2.2 mostra os níveis relativos de ruído em função da frequência, para os circuitos A,B,C e D.

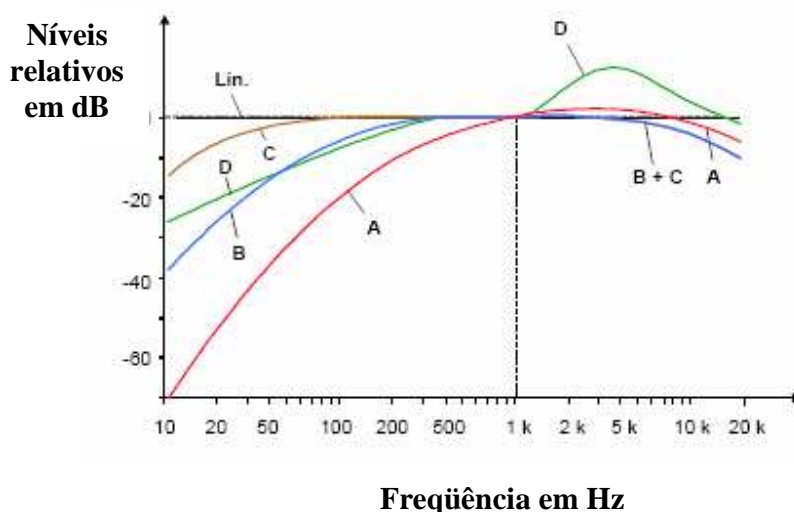


Figura 2.2 – Circuitos de compensação sonora A,B,C e D (BRUEL e KJAER, 1998) .

2.1.3 Propagação do som

O som se propaga uniformemente em todas as direções, diminuindo sua amplitude à medida que se afasta da fonte sonora em condições de campo livre. Ao encontrar um obstáculo, parte do som é refletida, outra parte do som é absorvida pelo obstáculo e outra parte do som será transmitida pelo obstáculo. As quantidades de som refletidas, absorvidas e transmitidas dependem do comprimento de onda e da amplitude do som e das propriedades do material que compõe o obstáculo. A figura 2.3 representa estas quantidades do som ao se deparar com um obstáculo.

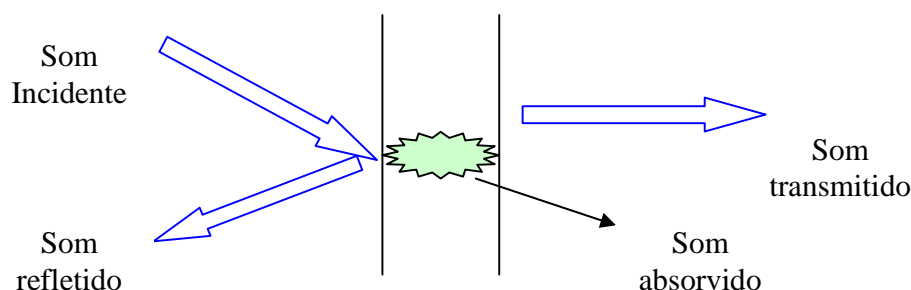


Figura 2.3 – Divisão do som ao encontrar um obstáculo (FERNANDES, 2002).

A partir da figura 2.3 podemos definir os seguintes coeficientes:

- a) Coeficiente de Reflexão Sonora(α_r): $\alpha_r = \frac{\text{energia acústica refletida}}{\text{energia acústica incidente}}$;
- b) Coeficiente de Absorção Sonora(α_a): $\alpha_a = \frac{\text{energia acústica absorvida}}{\text{energia acústica incidente}}$ e
- c) Coeficiente de Transmissão Sonora(α_t): $\alpha_t = \frac{\text{energia acústica transmitida}}{\text{energia acústica incidente}}$

2.1.4 Outros Conceitos Relevantes

Se uma onda sonora encontra uma superfície sólida, ao se propagar, esta onda é refletida. A **reflexão** de uma superfície é diretamente proporcional a rigidez desta superfície, paredes de concreto, mármore, vidro, etc...Refletem quase que a totalidade do som incidente.

A propriedade de determinados materiais em não permitir a reflexão do som por sua superfície chama-se **Absorção Sonora**. O som absorvido é a quantidade de som dissipado, transformado em calor, mais a quantidade de som transmitido. A dissipação de energia sonora por materiais absorventes depende da frequência do som, espessura da amostra e porosidade do material. A figura 2.4 mostra a variação do coeficiente de absorção sonora com a frequência para a superfície de um pavimento drenante.

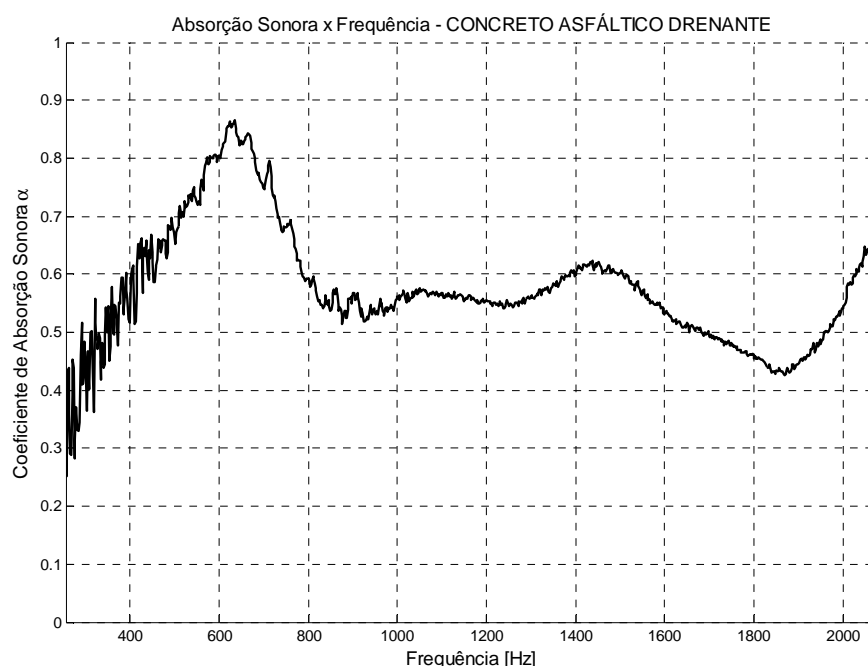


Figura 2.4 – Coeficiente de absorção em função da frequência para um pavimento drenante.

A propriedade sonora que permite que o som passe de um meio para outro através de uma superfície, continuando sua propagação chama-se **Transmissão**. O som ao atingir a superfície, faz com que a mesma vibre, transformando-a em uma fonte sonora, desta forma a superfície vibrante gera som na sua outra face. Com isso verifica-se que quanto mais rígida e densa for a superfície, menor a energia transmitida. A tabela 2.3 mostra a atenuação de transmissão do som dependente do tipo de material.

Tabela 2.3 - Atenuação na transmissão de som em função do tipo e espessura do material (FORTES, 2002).

Material	Espessura (cm)	Atenuação (dB)
Vidro	0,4 a 0,5	28
Vidro	0,7 a 0,8	31
Chapa de Ferro	0,2	30
Concreto	5	31
Concreto	10	44
Gesso	5	42
Gesso	10	45
Tijolo	6	45
Tijolo	12	49
Tijolo	25	54

As ondas sonoras são capazes de superar obstáculos ou propagar-se em um ambiente através de uma abertura. A esta propriedade se dá o nome de **difração**. De uma forma geral sons de baixa frequência difratam mais facilmente.

Um dos parâmetros que caracteriza determinado material, quanto ao seu comportamento na presença de sons, mais especificamente na presença de ruídos, é a **impedância acústica**. Conhecer este parâmetro é particularmente importante quando se busca estudar as condições de absorção e reflexão de determinadas superfícies. Como já descrito nesta revisão de literatura, quando a energia sonora incide sobre uma superfície, parte desta energia é refletida, parte é transmitida e parte da energia sonora é absorvida pelo material convertida em energia térmica. A capacidade de reflexão e absorção de um meio depende das características mecânicas do material, sua composição, forma de incidência das ondas sonoras e da frequência do som. A caracterização quanto às propriedades de absorção e reflexão de uma superfície são dados pelo coeficiente de absorção sonora, coeficiente de reflexão sonora e impedância acústica (z), que é definida como a razão entre a pressão acústica no meio e a velocidade de vibração de uma partícula situada neste ponto. Pode-se expressar esta relação pela seguinte equação:

$$z = \frac{P_+}{u_+} = \rho \cdot c, \quad (2.3)$$

Onde:

\underline{P}_+ - é a pressão acústica no meio (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x).

\underline{u}_+ - é a velocidade de vibração da partícula (para ondas planas se propagando no sentido positivo de x).

O valor da impedância acústica para ondas planas é um valor real de magnitude $\rho \cdot c$ (densidade \times velocidade do som no meio) com unidade $\text{kg/m}^2 \cdot \text{seg} = \text{rayl}$). Para ondas estacionárias ou divergentes, o valor de z em geral é um número complexo, dado por:

$$\underline{z} = \frac{\underline{P}}{\underline{u}} = r + i \cdot x, \quad (2.4)$$

Onde:

r - é a resistência acústica específica.

x - é a reatância acústica específica

i - é o número imaginário $\sqrt{-1}$

2.1.5 Materiais de absorção sonora

De uma forma geral, os materiais com alta absorção sonora são fibrosos ou porosos. Em materiais porosos a energia acústica incide sobre os poros e dissipa-se por múltiplas reflexões e atrito viscoso, transformando-se assim em energia térmica. Para materiais fibrosos a energia acústica penetra pelos interstícios das fibras, vibrando-as junto com o ar, a dissipação dessa forma ocorre por transformação da energia acústica em energia térmica pelo atrito entre as fibras excitadas.

Para o correto funcionamento destes materiais como materiais absorventes, é imprescindível que os mesmo admitam a passagem de um fluxo de ar, ocasionando dessa forma a propagação das ondas sonoras dentro do material. A caracterização de uma material quanto a absorção sonora é verificado pela determinação do coeficiente de absorção sonora α do mesmo, um material puramente absorvente possui um valor de $\alpha = 1$, e um material puramente reflexivo possui coeficiente de absorção sonora $\alpha = 0$. O valor do coeficiente de absorção sonora é sempre

positivo e varia seu valor de 0 a 1. Além disso sua magnitude depende da frequência do som, ângulo de incidência da onda sonora, do tipo de campo sonoro, da densidade, da espessura e da estrutura interna do material. Além do coeficiente de absorção sonora existem outros parâmetros que são utilizados para caracterizar um material quanto à absorção acústica, tais como:

- **Resistividade ao fluxo de ar:** A resistividade específica de fluxo R_s pode ser definida com a relação a seguir:

$$R_s = \frac{\Delta P}{u}, \quad (2.5)$$

Onde ΔP é a diferença de pressão do ar medida nos dois lados de uma amostra de material na qual se força a passagem de ar (N/m^2) e u é a velocidade do ar normal a superfície da amostra.

A resistividade de fluxo R é definida pela resistividade específica de fluxo por unidade de espessura do material dado por :

$$R = \frac{R_s}{d}, \text{ onde } d \text{ é a espessura da amostra de material.} \quad (2.6)$$

R tem como unidade o Rayl/m.

- **Porosidade (h):** a porosidade é definida como a relação entre o volume de vazios dos poros da amostra de material com relação ao volume total desta amostra. A porosidade pode ser quantificada pela equação a seguir:

$$h = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.7)$$

Onde:

V_v é o volume de vazios da amostra;

V_t é o volume total da amostra;

- **Fator estrutural (Tortuosidade) (S):** o fator estrutural mostra a influência da geometria da estrutura interna do material sobre a densidade efetiva e compressibilidade do fluido. Podem-se citar como formas internas da estrutura de materiais absorventes as cavidades laterais, variações de área da seção transversal e canais não axiais.

2.2 RUÍDO

O som pode ser agradável ou desagradável ao ouvido, uma música de qualidade é um exemplo de som agradável (considerando a subjetividade desta qualidade). O som gerado pelo contato pneu-pavimento é desagradável, portanto pode-se citar este som como o ruído que ocorre na interação pneu-pavimento. Dependendo da amplitude e duração, o ruído pode causar uma série de malefícios ao ser humano. Por exemplo, ruídos com NPS altos e de longa duração podem causar ao homem perda de audição e problemas de pressão sanguínea. Já ruídos com amplitudes moderadas podem causar interferência na conversação, distúrbios no sono, incômodo e conseqüentemente a perda de qualidade de vida dos cidadãos (**PIMENTEL, 1999**).

Para os ruídos gerados pelo tráfego o efeito inicial constatado ao ser humano é o incômodo, pode-se relacionar este efeito à amplitude e freqüência do ruído, assim como outros parâmetros como tonalidade, duração e comportamento transiente do ruído gerado pelo tráfego. A análise do incômodo é complexa e de difícil mensuração, pois varia ao longo de uma determinada população, por ser uma medida subjetiva.

2.2.1 Ruído gerado pelo contato pneu-pavimento

O aumento do volume do tráfego incrementa cada vez mais o problema do ruído nas vizinhanças de rodovias e vias urbanas. Desde a década de setenta os fabricantes de veículos tem se ocupado em pesquisar soluções que minimizam o ruído gerado pelos veículos automotores. Estas soluções, no entanto, tem privilegiado o usuário do automóvel.

O ruído total emitido por um veículo é determinado por uma combinação de ruídos de cada parte do automóvel. Duas fontes de ruído possuem predominância na geração do ruído total emitido, sejam eles o ruído gerado pela interação pneu-pavimento e o ruído advindo do chamado trem de força do veículo (ruído da unidade de força). O ruído do trem de força é composto do ruído do motor e todos seus acessórios, como transmissão e sistema de exaustão. De uma forma geral, o ruído da unidade de força é dominante para baixas velocidades enquanto que o ruído gerado pela interação pneu-pavimento é predominante para altas velocidades.

Existe uma velocidade de cruzamento na qual o ruído emitido pelo trem de força possui o mesmo valor do NPS do ruído emitido pelo pneu. Encontra-se na bibliografia, velocidades de cruzamento para direção a velocidade constante na faixa de 30 a 35 Km/h para caminhões e de 15 a 25 Km/h para carros de passeio (SANDBERG, 2001). A figura 2.5 mostra a contribuição das fontes de ruído de um veículo, para o ruído total emitido externamente para um veículo a baixa velocidade.

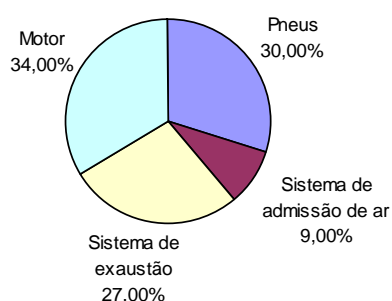


Figura 2.5- Contribuição das fontes de ruído do automóvel para o ruído total emitido (SANDBERG, 2001).

2.2.2 Geração do ruído e mecanismos de propagação resultantes da interação pneu-pavimento

Os mecanismos de geração do ruído advindo com contato pneu-pavimento são divididos em dois grupos de acordo com o meio onde o ruído ocorre e de acordo com seus efeitos. O primeiro mecanismo é relacionado com as vibrações mecânicas que ocorrem no pneu e é chamado de “structure borne”, o segundo mecanismo é relacionado com os fenômenos aerodinâmicos e é chamado de “air borne”, o primeiro mecanismo pode ainda ser subdividido em mecanismos de impacto e de choques e mecanismos de adesão (EJSMONT, 1997).

A contribuição de cada um desses mecanismos varia em função do tipo de pneu verificado, da superfície do pavimento e da velocidade do veículo (SANDBERG, 2001).

Os principais mecanismos de geração e amplificação do ruído são mostrados na tabela 2.4, além disso, outros fenômenos relacionados a estes mecanismos, mas que não podem ser considerados como de geração pura de ruído são apresentados.

Tabela 2.4 – Mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento (EJSMONT, 1997).

Mecanismos de geração	Mecanismo de vibração radial
	Mecanismo de ressonância do ar
	Mecanismo de adesão
Mecanismos de amplificação o ou mecanismos de redução	Efeito corneta
	Efeito de impedância acústica
	Efeito da impedância mecânica

2.2.3 Mecanismos de geração

A seguir são sumarizados os principais mecanismos de geração do ruído que ocorrem na área de contato pneu-pavimento (EJSMONT, 1997).

Vibração da banda de rodagem: os blocos da banda de rodagem giram com a rolagem dos pneus, ocorrendo um impacto oblíquo dos blocos da banda com a superfície do pavimento na área de contato de entrada entre o pneu e a superfície do pavimento. Pode-se comparar o impacto do bloco da banda de rodagem, com um pequeno martelo de borracha que bate no pavimento, causando vibração à carcaça do pneu. A figura 2.6 mostra a vibração causada pelo impacto entre a banda de rodagem e o pavimento.

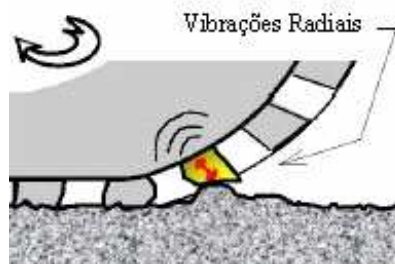


Figura 2.6 –Vibrações radiais no contato da banda de rodagem com o pavimento (OLEK, 2004).

Bombeamento de ar: dentro da área de contato do pneu com a superfície do pavimento, os canais formados pelos sulcos do pneu são comprimidos e distorcidos. O ar que entra nestes canais é bombeado e comprimido para dentro e para fora destas passagens, gerando desta forma o ruído. A figura 2.7 mostra o bombeamento de ar que ocorre quando do contato pneu-superfície do pavimento.

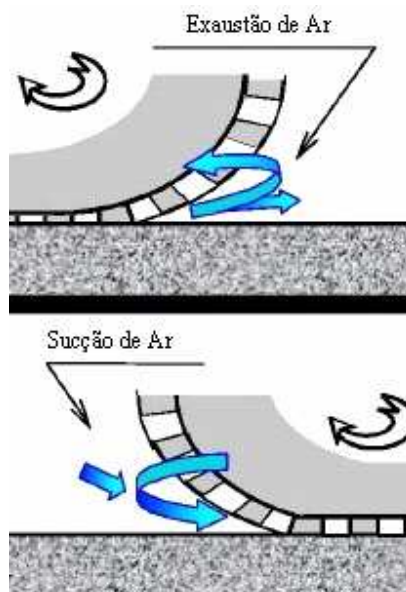


Figura 2.7 – Bombeamento de ar na entrada e na saída da área de contato pneu-pavimento (OLEK, 2004)

Movimentos de escorregamento e travamento (Slip – Stick): Dentro da área de contato de entrada, existe uma transferência de forças de tração no pneu, tanto na aceleração quanto na frenagem. Além disso, ocorrem distorções da carcaça do pneu na interface da área de contato,

entre os blocos da banda de rodagem com o pavimento, estes blocos experimentam dessa forma forças horizontais. Se estas forças excedem o limite do atrito dos blocos da banda de rodagem com a superfície do pavimento, ocorre um deslizamento, seguido de um travamento rápido, gerando dessa forma o ruído e a vibração. A figura 2.8 mostra esta configuração.

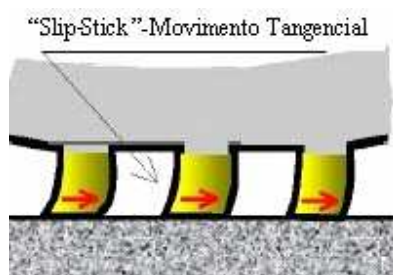


Figura 2.8–Movimentos tangenciais na área de contato pneu-pavimento (OLEK,2004).

Adesão (Stick – Snap): O contato entre os blocos da banda de rodagem com a superfície do pavimento, durante a rolagem, causam uma adesão entre estes blocos e o pavimento. No momento seguinte a adesão ocorre a liberação do bloco, criando dessa forma a energia sonora e a vibração na carcaça do pneu. A figura 2.9 mostra a adesão que ocorre na área de contato pneu-pavimento, durante a rolagem dos pneus.

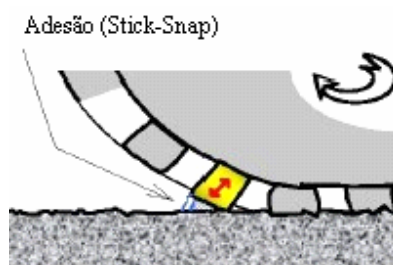


Figura 2.9–Adesão na área de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento (OLEK, 2004).

2.2.4 Mecanismos que realçam o ruído gerado pelo contato pneu-pavimento

Outros mecanismos além dos descritos nos parágrafos anteriores, são encontrados e podem aumentar ou reduzir o ruído gerado pelo contato pneu-pavimento. O mais importante deles é o **efeito corneta**, onde o ruído gerado perto da área de contato, pode ser amplificado, pelo próprio formato desta região, imediatamente a frente ou atrás da área de contato. Ocorrem múltiplas reflexões das ondas sonoras entre o pneu e a superfície do pavimento, amplificando dessa forma o ruído. Segundo Ejsmont (1997), também dentre os mecanismos de realce do ruído, pode-se destacar:

Ressonador de Helmholtz: Pode-se assumir que a ressonância que ocorre no ressonador de Helmholtz é análoga à ressonância acústica de um sistema massa-mola, onde o volume da cavidade (do sulco liberado no contato com a superfície) atua como mola e o ar presente entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento atua como massa. Este fenômeno é associado a uma faixa de frequência entre 1000 a 2000 Hz. A figura 2.10 mostra a configuração do ressonador de Helmholtz para o contato pneu-pavimento.



Figura 2.10 –Configuração do ressonador de Helmholtz formado pela forma da área de contato pneu- pavimento (OLEK, 2004).

Vibração da Carcaça do pneu: A energia criada pela vibração do pneu na interface da área de contato com a superfície do pavimento, é realçada pela resposta da carcaça do pneu. Ondas de vibração propagam-se pela banda de rodagem, que é o elemento estrutural do pneu localizado junto aos blocos da banda de rodagem. Estas ondas criam o ruído que é irradiado desde a carcaça, além disso, a área lateral da carcaça do pneu, próximo da área de contato, também vibra e irradia o ruído. A figura 2.11 mostra a vibração da carcaça do pneu.

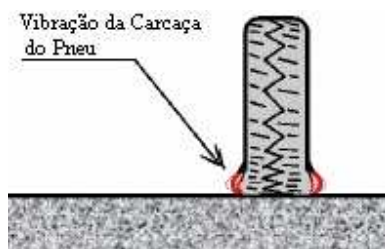


Figura 2.11–Vibração da carcaça do pneu (OLEK, 2004).

Ressonância acústica interna do pneu: O ar dentro do pneu é excitado pela excitação do pneu durante a rolagem. Em certas frequências, associadas a frequência natural de ressonância do pneu, a resposta do ar dentro do pneu é suficiente para fazer ressonar este ar interno e torná-lo audível externamente.

2.2.5 Mecanismos de propagação do ruído de rolagem

O ruído propagado de uma fonte sonora em campo livre é atenuado pela distância da fonte, a taxa de atenuação depende da forma da frente de onda (NELSON E PHILLIPS, 1994).

A Figura 2.12 mostra uma geometria simples de uma fonte e de um receptor acima de uma superfície plana. Se a fonte e o receptor estiverem próximos à superfície, ocorrerá reflexão sonora. Para uma superfície de concreto asfáltico denso, a diferença de trajeto entre a onda incidente e refletida é pequena e nenhuma interferência destrutiva ocorre entre estes. Sob estas circunstâncias, as ondas sonoras que chegam dos dois trajetos adicionam a intensidade sonora em 6 dB sobre a amplitude de campo livre. As frequências e as amplitudes destes efeitos da interferência dependem fortemente das propriedades acústicas da camada de superfície e do ângulo de incidência das ondas sonoras nesta superfície.

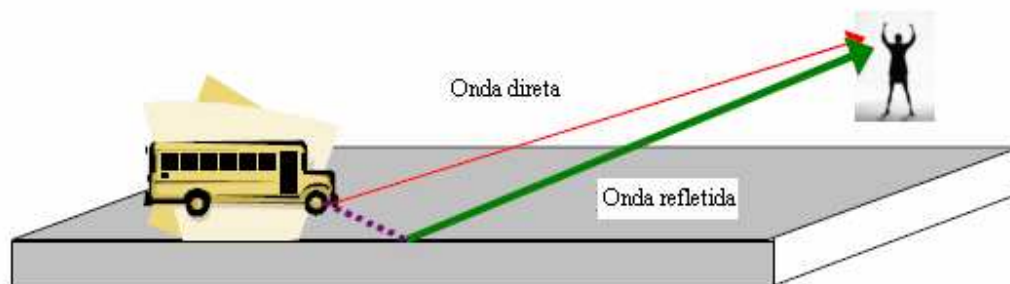


Figura 2.12 - Reflexão do ruído na superfície de pavimento denso (OLEK, 2004).

Quando a superfície de um pavimento é porosa, a diferença de comprimentos de trajeto entre as ondas sonoras diretas e refletidas é grande, como mostra a figura 2.13, ocorrendo interferência destrutiva no caminho da onda. Esta interferência ocorre em uma faixa de frequência entre 250 - 1000 hertz. O ruído dessa forma chega ao observador, com uma intensidade mais fraca.

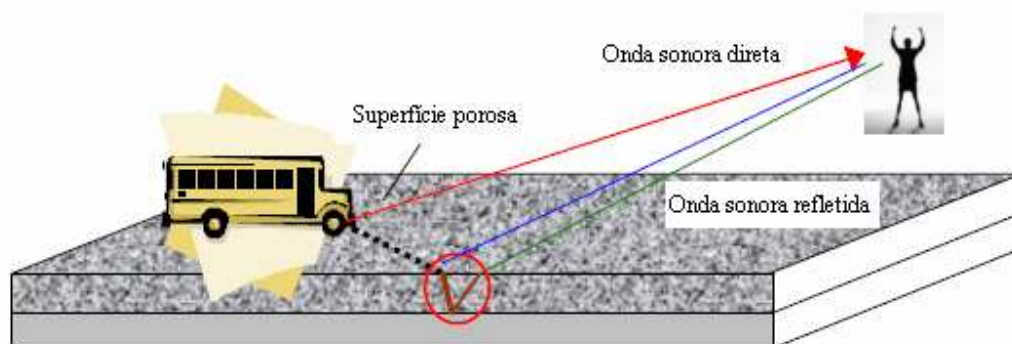


Figura 2.13 - Reflexão do ruído na superfície de pavimento poroso (OLEK, 2004).

2.2.6 Fatores Intervenientes na Geração do Ruído Produzido pela Rolagem dos Pneus

Os principais fatores a serem considerados na geração do ruído produzido pelo contato pneu-pavimento são:

Velocidade dos veículos: podem ocorrer acréscimos de 9 a 13 dB por duplicação de velocidade, dependendo das características vibro-acústicas dos pneus e da textura da superfície do pavimento.

De acordo com Sandberg (2001) a relação entre o NPS gerado e a velocidade pode ser fornecido pela equação:

$$\text{NPS} = A + B \cdot \log(V) \quad (2.8)$$

Onde A e B são constantes de velocidade determinadas experimentalmente. Plotando-se A e B em um gráfico cartesiano verifica-se que para combinações de pneu ou pavimento, tem-se um comportamento linear, como mostra a figura 2.14. Os pontos a, b, c e d na figura 2.14 representam combinações de pneu-pavimento.

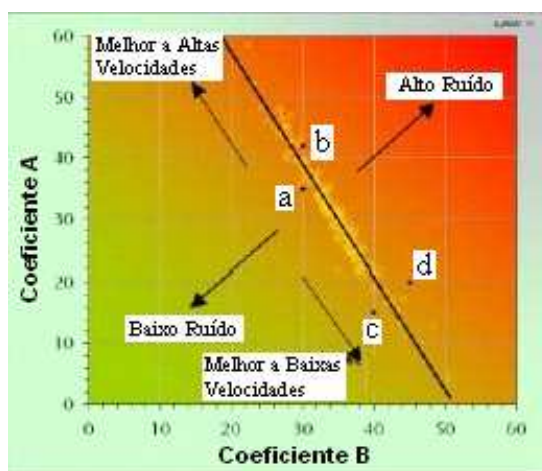


Figura 2.14 – Relação entre os coeficientes de velocidade A e B (SANDBERG, 2001).

Peso dos veículos e calibração dos pneus: Em geral um acréscimo na carga por roda para um veículo, causa um aumento no NPS emitido. A figura 2.15 mostra o efeito produzido pela variação do carregamento vertical (peso do veículo), o NPS para o pneu verificado, aumenta com o aumento do carregamento até 3 kN. Após esta carga uma diminuição no NPS é constatada. Explica-se esta variação no NPS pela variação da rigidez do pneu produzida pelo carregamento, onde o aumento da carga altera as frequências da carcaça do pneu, influenciando no NPS emitido.

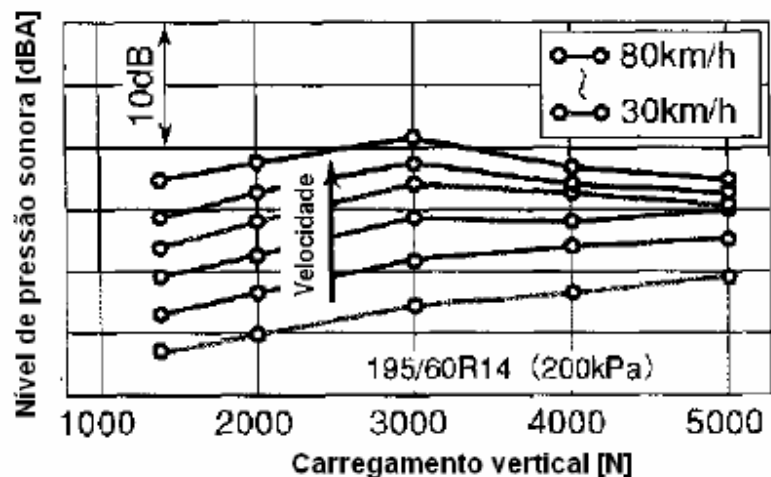


Figura 2.15- Alteração no NPS em função do carregamento (GERGES, 2005).

O efeito da calibração do pneu é verificado em função do torque exercido, variando dessa forma com as condições de aceleração. Pode-se afirmar que à medida que o torque aumenta o NPS aumenta com o aumento da pressão. Isto pode ser visualizado pela figura 2.16.

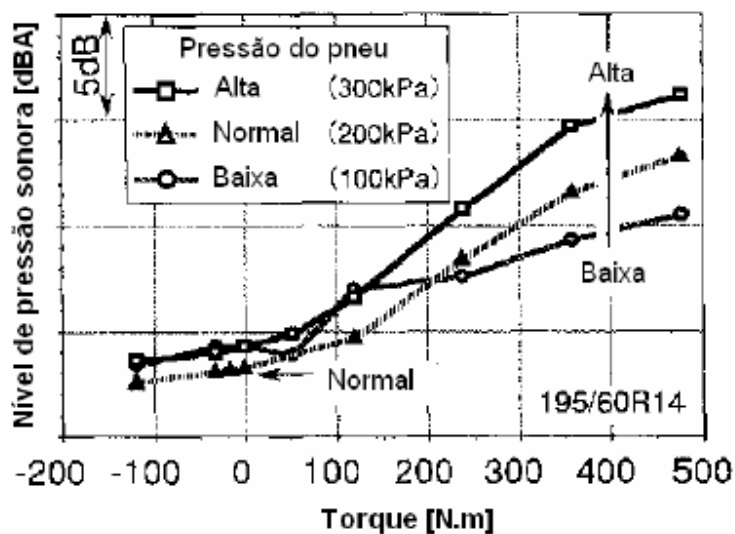


Figura 2.16 – Alteração no NPS emitido, devido ao torque e pressão do pneu (GERGES, 2005).

Água na Superfície da Pista: A presença da água na superfície do pavimento eleva consideravelmente o NPS emitido, podendo haver acréscimos de até 10 dB se comparadas às condições de geração de ruído com pista seca.

Largura dos Pneus: O ruído aumenta com o aumento da largura dos pneus. Por exemplo, aumentando-se a largura do pneu de 135 mm para 215 mm o ruído aumenta em até 4 dB. O aumento da largura dos pneus faz com aumente a radiação sonora da banda de rodagem, em função do aumento da área de contato entre a banda de rodagem e a superfície do pavimento.

Tipo de Ranhura dos Pneus: Pneus com predominância de ranhuras transversais geram mais ruído do que pneus com predominância de ranhuras longitudinais. Outro aspecto a ser considerado no desenho dos pneus, é que para pneus comerciais de carros de passageiros o desenho da banda de rodagem possui um arranjo desigual dos sulcos na direção circunferencial, como mostra a figura 2.17.

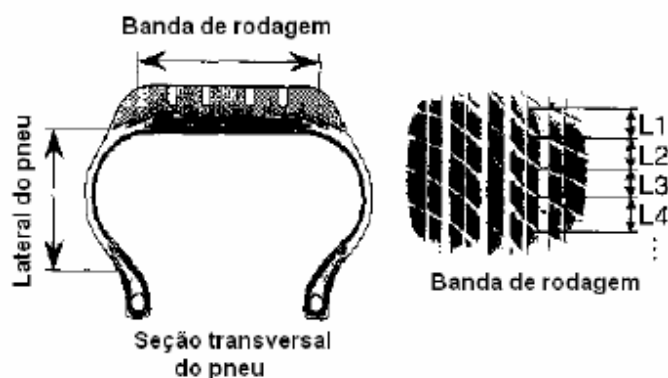


Figura 2.17 - Espaçamento variável na banda de rodagem (GERGES, 2005).

O espaçamento variável evita a geração de ruídos tonais que seriam causados por espaçamentos iguais entre os sulcos vizinhos. Havendo espaçamento variável consegue-se uma distribuição do ruído ao longo do espectro de frequências.

Características Superficiais do Pavimento: Como será visto nos itens seguintes, é grande a relação entre geração, intensidade do ruído e as características da superfície do pavimento.

2.2.7 Ruído de Rolagem dos Pneus Relacionado ao Tipo e Textura do Pavimento

Define-se como material denso, no estudo da acústica dos pavimentos, aqueles pavimentos que possuem um teor de vazios abertos entre 4 a 9 %. São chamados também de pavimentos com superfície fechada e apresentam a geração de ruído condicionadas as características da textura, sendo que seu coeficiente de absorção é próximo de zero pois a superfície densa pouco ou muito pouco, absorve as ondas sonoras, as refletindo em sua quase totalidade.

Devido às características de textura verifica-se uma relação estreita entre a aderência e o ruído. O que se busca na concepção de um pavimento é obter uma máxima aderência com mínimo ruído, porém para concretos asfálticos densos o aumento das dimensões da textura, necessárias para aumentar a aderência, colaboram para a elevação do ruído.

Para pavimentos densos, em geral, quanto mais “grossa” a textura da superfície, maior serão os níveis de ruído emitidos. A figura 2.18 mostra a comparação entre os ruídos de rolagem emitidos para diversos tipos de superfície. Constatou-se nessa comparação diferenças de até 17 dB entre a superfície mais ruidosa e a superfície mais silenciosa. Os níveis de ruído foram “medidos”, nesta comparação, com o método de medição em campo utilizando o trailer, chamado CPXI (Close Proximity Index) executado de acordo com a norma ISO/ DIS 11819-2, e as superfícies foram classificadas de acordo com o MPD (Profundidade Média do Perfil)(**SILVIA, 2004**).

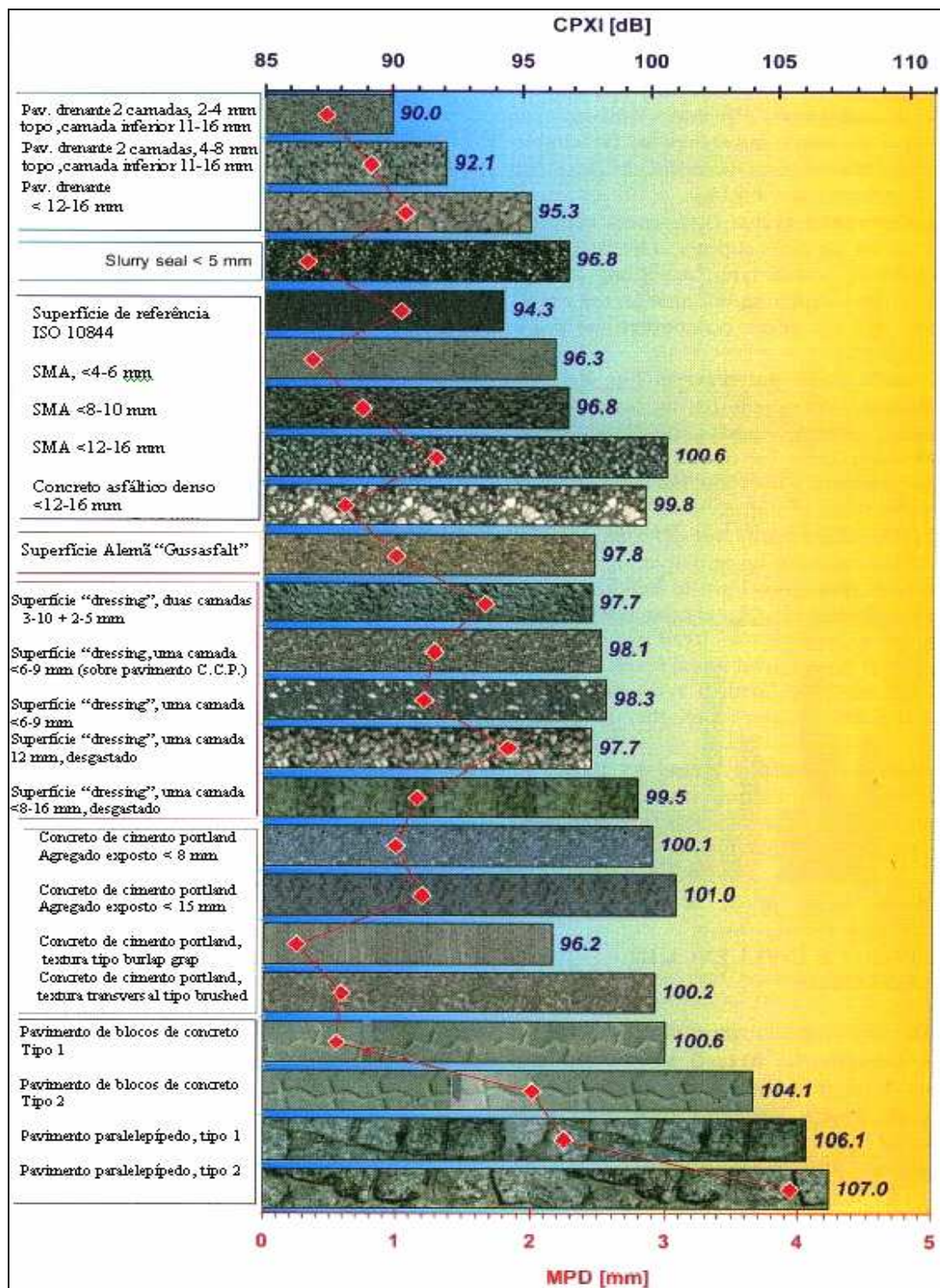


Figura 2.18 - Níveis de ruído de rolagem dos pneus em função de diferentes tipos de pavimentos, a 80 Km/h (SILVIA, 2004).

Outros parâmetros considerados para a caracterização acústica de pavimentos são a impedância acústica e a impedância mecânica. A impedância acústica em pavimentos depende dos vazios existentes na superfície do pavimento, enquanto que a impedância mecânica depende da rigidez relativa do pneu e do pavimento.

Apesar de toda pesquisa realizada nos últimos anos para a concepção de pavimentos silenciosos, ainda são poucas as rodovias desenvolvidas e executadas que fornecem baixos níveis de emissão de ruído, e que mantenham a segurança e durabilidade ao longo do tempo.

O tipo de textura selecionada para determinada via, tanto na Europa como nos Estados Unidos da América, é função de vários parâmetros, incluindo o volume de tráfego, clima, velocidade diretriz, custo e ainda a densidade populacional da área a ser implantada a via.

Nos Estados Unidos, verifica-se que a texturização das superfícies de rodovias com o objetivo de melhorar a segurança em condições de pista molhada têm gerado queixas e notificações por parte das populações que moram as margens destas vias, as agências reguladoras de transporte, pois o aumento excessivo nas texturizações tem provocado também um aumento do ruído emitido pelo tráfego (**DOT Arizona, 2002**).

Tanto a textura da superfície como o tipo de pavimento, possuem importantes papéis na capacidade de absorção sonora de um pavimento, sendo fatores determinantes para este parâmetro (**WAYSON, 1998**).

Uma superfície absorvente poderá reduzir o efeito corneta e reduzir o ruído nas laterais da via, pois a energia sonora não será eficientemente refletida neste tipo de superfície. Um aumento na macrotextura, como será visto mais adiante, resulta em uma maior difusão das ondas sonoras refletidas. Assim, embora superfícies com alta macrotextura gerem mais ruído por causa das vibrações radiais, ao mesmo tempo isto também resultará num decréscimo na propagação deste mesmo ruído.

Esforços no sentido de aumentar a segurança das rodovias bem como diminuir o impacto ambiental das mesmas com respeito às emissões de ruído estão sendo feitos já a mais de duas décadas tanto na Europa como Estados Unidos da América. Estes esforços embora não integrados, tem resultado em novas concepções de misturas asfálticas a serem empregadas na construção de vias e em novas texturas a serem aplicadas nas superfícies de rodovias ou vias urbanas.

A ênfase que se dá na Europa é ao desenvolvimento de novos tipos de misturas asfálticas a serem empregadas nos pavimentos, incluindo nestes, a aplicação de misturas de concreto asfáltico com borracha de pneu reciclado, duas camadas de concreto asfáltico drenante e concreto asfáltico drenante com incorporação de polímeros na mistura. Estas modificações têm por finalidade, aumentar as condições de aderência e diminuir a emissão de ruído. Já nos Estados Unidos, os esforços têm se concentrado na texturização das superfícies com intuito inicial de aumentar a segurança à derrapagem.

As medições efetuadas para analisar os fenômenos acústicos que ocorrem quando da interação pneu-pavimento, são, na sua maioria, reportadas como análises de campo, sendo influenciadas pelos seguintes condicionantes: temperatura do ar, velocidade do vento, efeitos devido ao tipo de veículo e efeitos de reflexão do som. Estes fatores fazem da interpretação dos dados para a avaliação do ruído, uma tarefa ainda mais difícil para a compreensão dos mecanismos fundamentais da geração do ruído pelo contato pneu-pavimento. Agora, se estes fatores tiverem um entendimento consistente, poderão ajudar no que diz respeito ao desenvolvimento de novos projetos de pneu ou na melhora das superfícies de pavimentos com relação a segurança e diminuição do ruído emitido.

Estudos sobre a emissão de ruído de diferentes tipos de pavimentos tem mostrado que o pavimento constituído de concreto de cimento portland, é em geral, o tipo de pavimento mais ruidoso. A texturização deste pavimento para melhorar suas condições de aderência pode influenciar significativamente a geração do ruído de rolagem dos pneus na via.

Concretos asfálticos de graduação aberta e superfícies drenantes, tem sido testadas na Europa. Estes tipos de pavimentos conseguem promover reduções de até 8 dB, no entanto, a redução da capacidade de mitigar as emissões de ruído desses pavimentos diminuem com o tempo (SANDBERG, 2001).

Pode-se afirmar que o fator determinante das condições de atrito de uma superfície de um pavimento em condições de pista molhada é a textura da superfície. Antes da pesquisa realizada pela AIPCR (World Road Association), pelo seu comitê de características de superfície de rodovias em 1987, as irregularidades da superfície de um pavimento eram divididas em três faixas de valores: microtextura, macrotextura e megatextura. Após 1987 a AIPCR desenvolveu a seguinte classificação para as irregularidades da superfície de um pavimento: irregularidades superficiais, megatextura, macrotextura e microtextura. Cada uma dessas faixas de valores de irregularidades possui diferenças quanto a amplitude do comprimento de onda das mesmas, como mostra a figura 2.19.

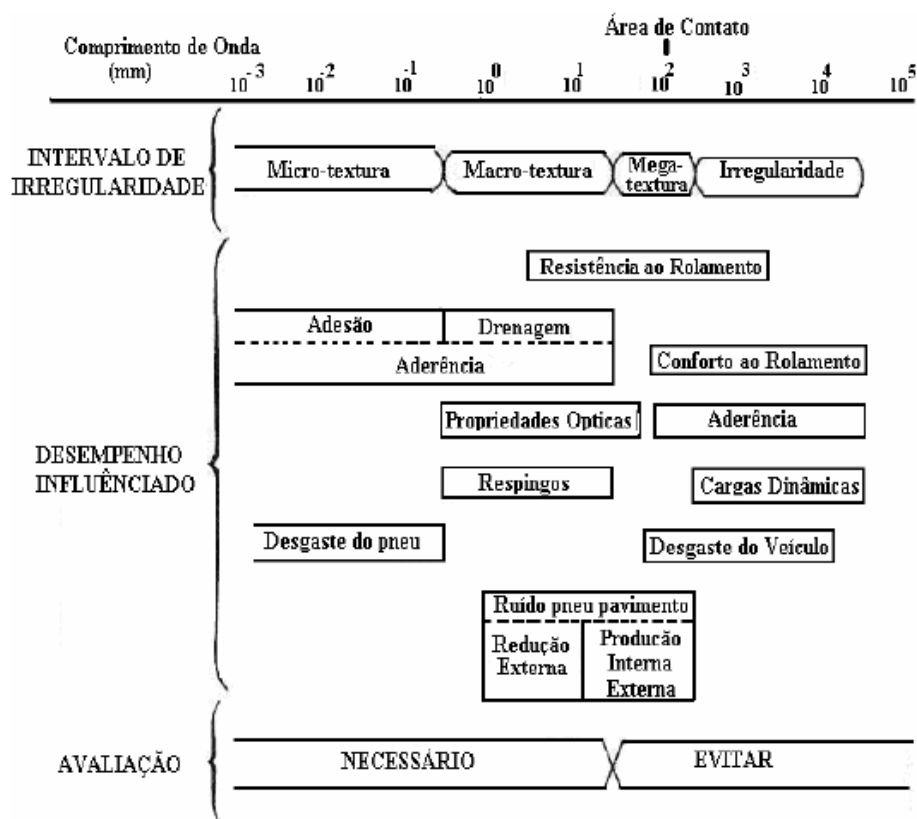


Figura 2.19 -Faixas de valores de irregularidades e fenômenos que ocorrem no contato pneu-pavimento (MEURER FILHO, 2001).

Foi investigado pelo grupo de estudos da ISO, a importância de cada uma dessas faixas de valores de irregularidades para a segurança a derrapagem e nas emissões de ruído. Verificou-se que a microtextura é importante para o desenvolvimento do atrito, ou seja para a segurança, mas não é tão significativa para a geração do ruído pneu-pavimento. Já a macrotextura e megatextura possuem papel importante na geração do ruído e também na segurança à derrapagem.

Para baixas frequências, o ruído é causado pelas vibrações do pneu e é função de grandes comprimentos de onda para a megatextura. A amplitude da microtextura possui papel decisivo no atrito da camada superficial, buscando-se sempre a manutenção deste parâmetro (OLEK, 2004).

Uma melhora com relação a macrotextura pode ser buscada com a exposição dos agregados nas camadas de superfície de um pavimento, e também pode ser produzida com texturas porosas. A texturização da superfície para aumentar a macrotextura, serve também para remover a água superficial, em condições de pista molhada.

A megatextura é responsável pelas vibrações radiais e fenômenos de ressonância associados ao veículo. A megatextura pode ainda, ser aumentada pelo desgaste da superfície da pista com o tempo e pelo processo de fadiga do pavimento.

Os meios mais utilizados em países desenvolvidos para se avaliar a textura de maneira completa é através da utilização de perfilômetros a laser, que analisam o espectro do perfil longitudinal de uma rodovia. As especificações para a correta utilização destes equipamentos é padronizado pela ISO 13473-1 de 1997.

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A POROSIDADE E O ATRITO

A porosidade reduz eficazmente o efeito do bombeamento do ar, diminuindo a emissão do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento. Os efeitos de realce do ruído, como o efeito corneta, também são reduzidos pela passagem das ondas sonoras pelos poros do material da camada de superfície.

A absorção acústica ocorre quando as ondas sonoras passam pelos poros da camada porosa e dissipa-se por atrito viscoso, transformando a energia sonora em calor. Além deste efeito benéfico, a porosidade ajuda a diminuir o “spray” gerado pela rolagem dos pneus de um veículo em condições molhadas e aumenta o atrito. No que tange aos mecanismos de geração mecânica do ruído, ainda, não está evidenciado o modo como a estrutura porosa afeta estes mecanismos.

Atrito é a propriedade que rege a segurança a rolagem dos pneus na interação pneu-pavimento e é função das condições ou características da superfície e do número de pneus em contato com a superfície. Devido ao atrito, o pneu pode transmitir forças longitudinais e laterais entre a superfície do pavimento e o veículo. Uma boa condição de atrito constitui a chave para a segurança à derrapagem e conseqüentemente à dirigibilidade (**MOMM, 2000**).

Antes dos estudos para a concepção de vias silenciosas, acreditava-se que para a obtenção de um pavimento com boa condição de atrito, necessariamente deveria existir uma grande geração de ruído de rolagem. Com o avanço da tecnologia das misturas de concreto asfáltico se aceita atualmente, que alcançar um alto coeficiente de atrito e ainda um baixo nível de emissão de ruído de rolagem, não são necessariamente requisitos conflitantes.

Como colocado anteriormente, as características de superfície que determinam o atrito são a megatextura, microtextura e macrotextura, e também a interação da borracha do pneu com o pavimento. Megatextura e macrotextura podem ser mensuradas diretamente, e as mensurações com respeito a microtextura podem ser obtidas indiretamente usando o pendulo britânico (**AIPCR, 1991**).

Na pesquisa de Phillips, em 1994, a resistência a derrapagem de vários tipos de superfície foram calculadas utilizando-se um perfilômetro SMTP (sensor de medida profundidade de textura). Verificou-se nesta pesquisa que para altos valores de SMTP, implicaram em uma boa resistência a derrapagem, associou-se a isso a altos valores de megatextura, conseqüentemente predizendo e verificado posteriormente com medições de campo, em altos níveis de ruído emitidos.

Com relação a superfícies porosas verifica-se uma alta resistência à derrapagem, mas sem apresentar altos níveis de megatextura e conseqüentemente baixos níveis de emissão de ruído de rolagem.

2.4 TIPOS DE SUPERFÍCIES DE RODOVIAS COM BAIXOS NÍVEIS DE RUÍDO EMITIDOS

Sandberg (2002) define superfícies de rodovias de baixos níveis de emissão de ruído aquelas que geram um ruído de até 3 dB (A), abaixo das emissões de ruído de superfícies consideradas convencionais como o concreto asfáltico denso⁴.

Na Europa, a execução de pavimentos que possuem como característica a baixa emissão de ruído de rolagem tem sido realizado com diferentes tipos de misturas asfálticas. A execução de pavimentos drenantes (ou também chamados porosos) tem prevalecido como maneira mais adequada para garantir esta característica de baixa emissão de ruído.

A utilização de pavimentos de concreto de cimento portland com um grande índice de vazios, também chamados de pavimentos de concreto porosos está em estágio experimental. Além disso, modificações em pavimentos de concreto de cimento portland através da texturização dos mesmos, está sendo utilizada visando à diminuição das emissões de ruído de rolagem nestes pavimentos.

A execução de rodovias com superfície drenante possui registros da década de 80 na Europa, principalmente em países como França, Bélgica, Holanda e Itália. Como exemplo pode-se citar a Holanda que a partir do final dos anos 80 possui como padrão para a construção de rodovias estas superfícies (**DESCORNET, 2006**).

De acordo com Sandberg (2002), para que se possa alcançar uma rodovia “silenciosa”, ou seja, com baixos níveis de emissão de ruído de rolagem, devem ser seguidos os seguintes passos:

⁴ Concreto asfáltico denso produzido na Europa (ISO 10844) com 7% de vazios e agregados de tamanhos variando de 11 a 16 mm no seu tamanho máximo.

Capa de Concreto asfáltico com agregados de tamanho máximo entre 3 a 6 mm, com bordas angulosas;

A Macrotextura deve ser maximizada, com relação ao comprimento de onda do perfil longitudinal, no máximo entre 2 a 6 mm para locais de tráfego de veículos de passeio e entre 4 e 8 mm para locais de tráfego de caminhões;

A Megatextura deve ser maximizada, com relação ao comprimento de onda do perfil longitudinal, no máximo entre 50 a 100 mm, com vazios de maneira uniforme;

A porosidade deve ser tal que diminua a ocorrência de colmatção, ou que a mesma seja retardada;

Os vazios comunicantes devem estar presentes na mistura executada em campo;

A espessura da camada superficial deve ser em torno de 40 mm, para se obter um pavimento que absorva bem até mesmo ruídos de baixa frequência e a

Camada superficial deve possuir uma alta percentagem de vazios comunicantes, não descuidando também da questão da durabilidade, esta percentagem de vazios deve ser de no mínimo de 20 %, sendo o teor ideal entre 25 a 30 %.

2.4.1 Concretos asfálticos drenantes

De acordo com a AFNOR (Association Française de Normalisation), os concretos asfálticos drenantes podem ser definidos como aqueles concretos asfálticos que possuem percentagem de vazios superior a 20 %, cuja forma dos vazios é tal que as águas das chuvas circulam entre os vazios comunicantes (AFNOR – NF P 98 -134, 1991). A preparação destes concretos asfálticos é feita a partir de granulares minerais e cimentos asfálticos puros ou modificados, eventualmente com modificadores de adesividade e/ou aditivos orgânicos dosados, aquecidos e misturados em central de usinagem, sendo posteriormente transportados, espalhados e compactados sobre a

estrutura do pavimento. A tabela 2.5 mostra composições típicas de concretos asfálticos drenantes de alguns países europeus. Pode se perceber por esta tabela a designação dos concretos asfálticos drenantes segundo sua granulometria, e seus caracteres de descontinuidade em função da brecha (gap) que é mantida ausente da curva granulométrica da mistura.

Tabela 2.5 – Composições típicas de concretos asfálticos drenantes de alguns países europeus (RAINIERI, 2005).

País	Composição do concreto asfáltico drenante	Porcentagens dos materiais
França	Agregado graúdo 6/10	85-90%
	Areia	8-12%
	Filler	1-4%
	Cimento asfáltico puro	4.4 - 4.8%
	Cimento asfáltico modificado	4.7-5.2%
	Cimento asfáltico modificado com borracha de pneu	5.7 – 6.1%
	Cimento asfáltico modificado na produção	5.1 - 5.5%
Bélgica	Agregado graúdo 7/14	83%
	Areia	12%
	Filler	5%
	Cimento asfáltico 80/100	4.0 - 5.0%
	Cimento asfáltico modificado com borracha de pneu	5.5 - 6.5%
Alemanha	Agregado graúdo 5/11	75-88%
	Agregado miúdo 2/5	2 -15%
	Filler	4-6%
	Cimento asfáltico	5.3-6.8%
Holanda	Agregado graúdo 6/16	85%
	Areia	10.5%
	Filler	4.5%
	Cimento asfáltico 80/100	4.5%
Reino Unido	Agregado graúdo 3/10	82-88%
	Areia	6-15%
	Filler (mínimo 2% of hydrated lime)	3-6%
	Cimento asfáltico modificado (100/200 pen)	3-5%
Áustria	Agregado graúdo 8/11	80-85%
	Areia	10-16%
	Filler	4-8%
	Cimento asfáltico modificado	≥ 5.2%

Concebidos inicialmente para favorecer a eliminação d'água presente na superfície das pistas de rolagem, os pavimentos drenantes afetam vários outros fenômenos que ocorrem dentro da área de contato pneu-pavimento. Dentre estes fenômenos destaca-se a redução dos níveis de ruído gerado pela rolagem dos pneus na superfície do pavimento.

A figura 2.20 mostra a difusão da execução de pavimentos drenantes na Europa nos últimos 20 anos.

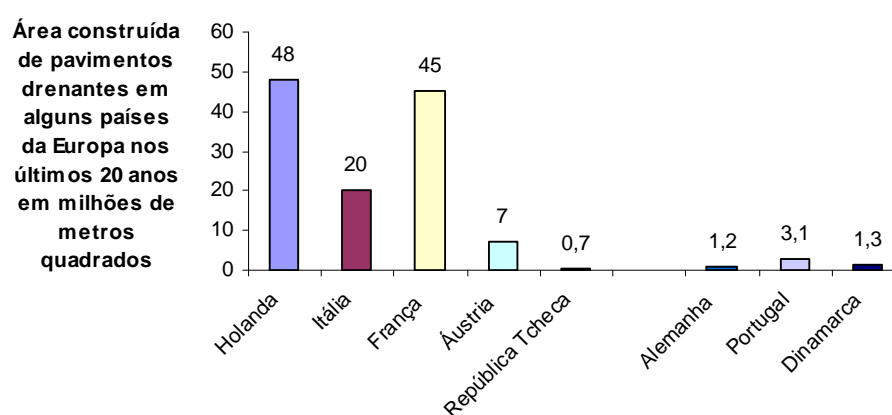


Figura 2.20 – Difusão dos concretos asfálticos drenantes em alguns países da Europa (RAINIERI, 2005).

A difusão dos concretos asfálticos drenantes (porosos) na Europa decorre das inúmeras vantagens que este tipo de superfície de pavimento oferece. A seguir são sumarizadas estas vantagens, detalhando-se com mais propriedade a capacidade de diminuição do ruído gerado no contato pneu-pavimento (RAINIERI, 2005).

Aquaplanagem (hidroplanagem): Os pavimentos drenantes praticamente eliminam a ocorrência de hidroplanagem, pelo escoamento da água superficial;

Formação de névoa atrás dos veículos: O pavimento drenante atua eliminando a quantidade de água na superfície e permite que a água sob pressão percole por seus canais internos impedindo a pulverização da mesma a outros veículos;

Aderência: Para superfícies de pavimentos drenantes ocorre um aumento da aderência entre o pneu-pavimento, especialmente para altas velocidades;

Viscoplanagem: O fenômeno da viscoplanagem é vinculado à macrotextura da superfície do pavimento, ou seja a aspereza da superfície dos granulares que compõe o concreto asfáltico. O pavimento drenante reduz os riscos de ocorrência de viscoplanagem .

Reflexão da luz: Em pistas com água na superfície a água pode recobrir as saliências formadas pelos granulares, os raios de luz dos faróis dos veículos é totalmente refletida, dessa forma não existe retorno de luz difusa na direção do motorista. Em pavimentos drenantes a água percola pelo pavimento, com isso a superfície do pavimento não fica submersa e a visibilidade se mantém adequada.

Conforto ao dirigir: As condições de direção melhoram para o motorista em função da não existência de formação de “spray” d’água e também com relação à diminuição do ruído interno e externo ao veículo.

Incremento da velocidade média em dias de chuva: O aspecto seco dos pavimentos drenantes contribuem para um acréscimo no desenvolvimento da velocidade de direção em dias de chuva, reduzindo assim o congestionamento nestes dias.

Redução do ruído de rolagem : dentre as propriedades descritas anteriormente, a importância ambiental desta propriedade e de suma importância para uma melhora na qualidade de vida das populações. De acordo com Bonnot (1997) os concretos asfálticos drenantes podem reduzir drasticamente os níveis de ruído de rolagem, sendo esta diminuição função de três efeitos principais:

a) Como o material é poroso a emissão de ruídos de alta frequência produzidos pela compressão e descompressão do ar, retido na interface pneu-pavimento é reduzido de maneira significativa;

b) A porosidade do concreto asfáltico drenante reduz o efeito corneta, que amplifica o ruído a frente e atrás da área de contato pneu-pavimento;

c) Durante o processo de compactação as partículas da superfície dos concretos asfálticos drenantes são pressionadas de modo que ficam com faces planas no plano da superfície do pavimento. Assim os níveis de ruído de baixa frequência produzidos pelo impacto da banda de rodagem com as partículas da superfície do pavimento são diminuídos. Isto se torna importante, pois são os ruídos de baixa frequência, principalmente os produzidos por veículos pesados, que se propagam a grandes distâncias.

Como já descrito nesta pesquisa bibliográfica, em comparação com pavimentos considerados densos existe uma diminuição nos níveis de ruído emitidos na rolagem dos pneus, em torno de 3 dB (A) podendo chegar até 8 dB (A).

2.4.1.1 Classes dos concretos asfálticos drenantes

De acordo com Momm (2000) os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados:

Segundo as camadas: Os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados em função do número de camadas e sua posição na estrutura do pavimento, podendo ser camada simples ou dupla quando executados na superfície e como camada para reserva de água, disposto dessa forma como camada de base. Os concretos asfálticos drenantes de camada simples possuem capacidade de absorção sonora tanto dos ruídos advindo do trem de força do veículo, quanto do ruído advindo da rolagem dos pneus. (**DESCORNET apud DELANNE, Y., 2006**).

A espessura da camada simples de concreto asfáltico drenante executada é de 4 cm. Já os concretos asfálticos de camada dupla combinam otimização da textura com otimização da capacidade de absorção sonora, para valores apropriados de frequência (entre 500 a 1000 Hz), devido a seu alto teor de vazios (25 a 30 %). O desempenho acústico destas misturas é excelente logo após a sua execução, conseguindo diminuir a intensidade sonora em até 6 dB(A) com veículos trafegando a 50 Km/h. Pode-se afirmar que os pavimentos drenantes de camada dupla estão entre os pavimentos menos ruidosos executados atualmente. De uma forma geral as

espessuras encontradas para este tipo de pavimento ficam em torno de 7 cm, sendo 2,5 cm de espessura para a camada superior (com agregados de menor dimensão, tipicamente 4/8) e de 4,5 cm para a camada inferior (com agregados de maior dimensão, tipicamente 0/14, 0/16 e 11/16) (DESCORNET, 2006).

Segundo a geração: concretos asfálticos drenantes podem ser classificados de acordo com seu índice de vazios, sendo os chamados de 1ª geração aqueles que possuem vazios entre 20 e 25 %, os de 2ª geração aqueles com vazios entre 25 e 28 % e os chamados de terceira geração aqueles com mais de 28 % de vazios;

Segundo o uso de areia na mistura: a composição granulométrica pode ser com ou sem areia, deve-se ter cuidado, pois a utilização de areia pode causar problemas de deformação permanente;

Segundo a presença de brechas (gaps) na granulometria: os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados de acordo com a existência ou não de lacuna na granulometria, podendo ser de granulometria aberta sem eliminação de determinada peneira na mistura ou eliminando-se o material de uma peneira, para a confecção da mistura.

2.4.1.2 Desvantagens da utilização do concreto asfáltico drenante

Podem-se citar como desvantagens deste tipo de pavimento:

- **Colmatação:** A característica principal dos concretos asfálticos drenantes é seu elevado teor de vazios. Com o tempo este teor diminui significativamente, podendo a colmatação dos poros chegar a 50 % em um período de cinco anos.
- **Risco de deformação permanente:** O principal dano que afeta os pavimentos drenantes é o risco de deformação permanente, que pode ocorrer devido ao seu elevado teor de vazios e a granulometria descontínua da mistura.

2.4.2 Superfícies de pavimento de concreto de cimento portland não poroso

Pavimentos convencionais de concreto de cimento portland são extremamente ruidosos. Por este motivo, buscou-se com a texturização da superfície destes pavimentos uma alternativa para diminuir o ruído emitido na rolagem. Os testes para verificação da diminuição ou não das emissões do ruído incluem texturização na direção longitudinal e transversal ao pavimento. Pode-se citar as técnicas de tinning, grinding, grooving, bruching ou dragging como técnicas de texturização longitudinal que obtiveram alguma eficiência na diminuição do ruído de rolagem. Mais recentemente a técnica de conceber superfícies com agregados expostos, tem sido tentada para diminuir o ruído de rolagem nestes pavimentos. Técnicas de texturização são realizadas, principalmente nos E.U.A., desde a década de 50 em pavimentos de concreto de cimento portland com o objetivo de aumentar a aderência. A figura 2.21 mostra uma técnica de texturização comumente realizada nos Estados Unidos com a finalidade de reduzir o ruído de rolagem dos pneus (SilVia, 2005).

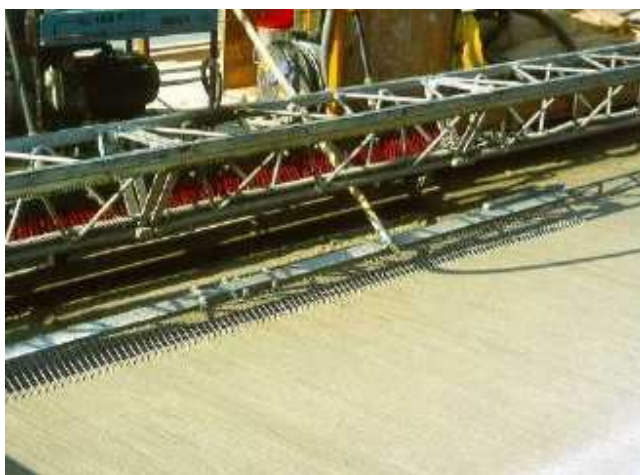


Figura 2.21 – Técnica de texturização longitudinal em pavimentos de concreto de cimento portland utilizada nos EUA (SilVia, 2005).

2.4.3 Pavimento de concreto de cimento portland poroso

Estes pavimentos, ainda, estão em fase de experimentação. Von Méier (1998), mostrou que um aumento da porosidade interna do pavimento de concreto de cimento portland, melhora suas

propriedades de absorção sonora e conseqüentemente favorece a diminuição do ruído emitido durante a rolagem. Mas para este tipo de pavimento, o aumento da megatextura traz desconforto à dirigibilidade do usuário da via. Trabalhos relacionados a este tema tem sido relatados em vários países, mas possuem como enfoque principal a melhora da durabilidade e resistência mecânica da mistura de concreto (OLEK, 2004). A figura 2.22 mostra o ensaio com o pêndulo britânico de um pavimento de concreto de cimento portland poroso.



Figura 2.22 – Pavimento de concreto de cimento portland poroso, ensaio com pêndulo britânico (AGOSTINACCHIO, 2005).

2.4.4 Pavimentos com superfícies emborrachadas

Podem-se citar como superfícies de pavimentos emborrachadas, os concretos asfálticos densos ou SMA (Stone Matrix Asphalt) com uma certa porcentagem de borracha granular moída de pneu adicionada à mistura.

A borracha pode ser adicionada como grânulos a mistura betuminosa (3 a 6 % do peso total). Este processo é chamado de incorporação de borracha via "seca" ou também chamado de asfalto borracha a seco. A borracha também pode ser adicionada como um pó (até 15 %, tipicamente 7 %) sendo este processo chamado de incorporação de borracha via "úmida".

Segundo Sandberg (2002), não há evidência conclusiva para se afirmar que a incorporação de pequenas quantidades de borracha a mistura betuminosa possa reduzir a emissão de ruído em pavimentos, necessitando mais estudos a este respeito. Este tipo de pavimento teve seu início na Suécia, onde é chamado de Rubit, nos E.U.A. é chamado de Plusride.

2.4.5 Superfícies Porosas-Emborrachadas

Define-se superfícies porosas-emborrachadas (*PERS*) como aquelas superfícies que possuem graduação aberta e alto teor de vazios comunicantes, a fim de facilitar a passagem do ar e da água através dele. A superfície é dita elástica pela incorporação de material elástico a mistura, como borracha ou outros produtos elásticos, como principal agregado. O índice de vazios é menor do que 20 % por volume total e a quantidade de material elástico a ser incorporado é menor do que 20 % sobre o peso total.

A mistura típica de um *PERS* consiste de partículas de borracha em forma cúbica ou partículas de fibra de borracha (borracha nova ou de pneu). Agregados minerais, areia ou outro material que possa realçar o atrito às vezes são utilizados na mistura colando-os com poliuretano ou outra resina artificial. A espessura típica deste tipo de pavimento é de 3 a 4 cm. O *PERS* pode ser executada em campo ou pré-fabricadas como um “tapete” que pode ser colada à camada inferior rígida, para isso faz-se uso de resina epoxy.

O *PERS* possui alto poder de mitigação do ruído de rolagem, chegando a valores de diminuição do NPS de até 12 dB (A). Os inconvenientes reportados sobre o *PERS* são a dificuldade de manter-se unido à camada inferior e problemas relacionados à aderência, além disso, seu custo de produção é muito alto devido à utilização de resinas no seu processo de fabricação. A utilização do *PERS* ainda está em estágio experimental, sendo já executado na Suécia e Japão. A figura 2.23 mostra uma superfície porosa-emborrachada em teste em Estocolmo na Suécia.



Figura 2.23 -Superfícies porosas-emborrachadas em teste na Cidade de Estocolmo, Suécia (Silvia, 2006).

2.4.6 Concretos betuminosos delgados (BBTMs)

Podem-se definir camadas finas ou “*BBTMs*” como uma camada delgada de mistura asfáltica colocada sobre um pavimento já existente ou novo que possui descontinuidade em sua granulometria, favorecendo dessa forma a incorporação de vazios nesta mistura. O conceito de camadas delgadas ou finas teve início na França (final da década de 90), com a necessidade de se melhorarem as condições de funcionalidade de rodovias que já possuíam reforço estrutural, mas que possuíam problemas de permeabilidade e atrito. Este tipo de revestimento pode ser dividido em três categorias:

- **BBM** (Béton Bitumineux Mince) ou concreto betuminoso delgado, com espessuras entre 3 a 4 cm ;
- **BBTM** (Béton Bitumineux Très Mince) ou concreto betuminoso muito delgado, com espessuras entre 2 a 3 cm e os chamados
- **BBUM** (Béton Bitumineux Ultra- Mince) ou concreto betuminoso ultra delgado, com espessura de 1 cm.

As camadas delgadas podem fazer parte de camadas de revestimento SMA (graduação aberta ou semi-densa) e de camadas de concretos asfálticos porosos.

Camadas delgadas ou finas estão de acordo com o desempenho acústico de um revestimento poroso de uma ou duas camadas e com o desempenho a durabilidade de uma mistura SMA normal. Para a otimização da textura geralmente se empregam agregados de tamanho pequeno. A redução do ruído alcançada por estas superfícies está na melhora da textura da superfície e não na absorção sonora. De acordo com os resultados do trabalho de Brosseaud et al (1997), a redução no NPS pode chegar a 3 dB(A), quando comparadas a superfícies densas. O IPG (“Innovatie Programma Geluid ”) na Holanda relata uma redução de 4 até 7 dB (A) para camadas finas porosas e de 3 até 5 dB (A) para as misturas tipo SMA (www.innovatieprogrammageluid.nl).

2.4.6 Concepção de vias silenciosas

O problema da geração do ruído no contato pneu-pavimento é complexo e desafiador em muitos aspectos. Todos os mecanismos de geração são importantes e contribuem para a emissão total de ruído proveniente da interação pneu superfície do pavimento. Desta forma, diferentes fontes e mecanismos podem dominar a geração deste ruído. Isto torna difícil o desenvolvimento de medidas para o combate deste problema. A eliminação do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento por completo, não é possível, pois para isso, deveria haver a eliminação de todas as fontes de geração deste ruído. Além disso, se os mecanismos de geração possuírem similaridade com relação ao nível de ruído emitido, a utilização da estratégia de suprimir apenas um mecanismo de geração não terá um efeito maior sobre o ruído total emitido, pois neste caso os outros mecanismos de geração serão predominantes.

Pode-se afirmar que os mecanismos que realçam o ruído gerado pela rolagem dos pneus complicam, ainda, mais as estratégias a serem utilizadas para a diminuição deste tipo de ruído, pois a contribuição de diferentes mecanismos de realce são, em geral, difíceis de se distinguir.

Assim, ainda não está suficientemente claro quais são os mecanismos mais importantes para a emissão do ruído, quando houver por exemplo, uma variação nas condições de superfície do pavimento, portanto mais estudo e pesquisa se faz necessário para este entendimento.

2.5 MEDIÇÕES DO RUÍDO GERADO PELO CONTATO PNEU-PAVIMENTO

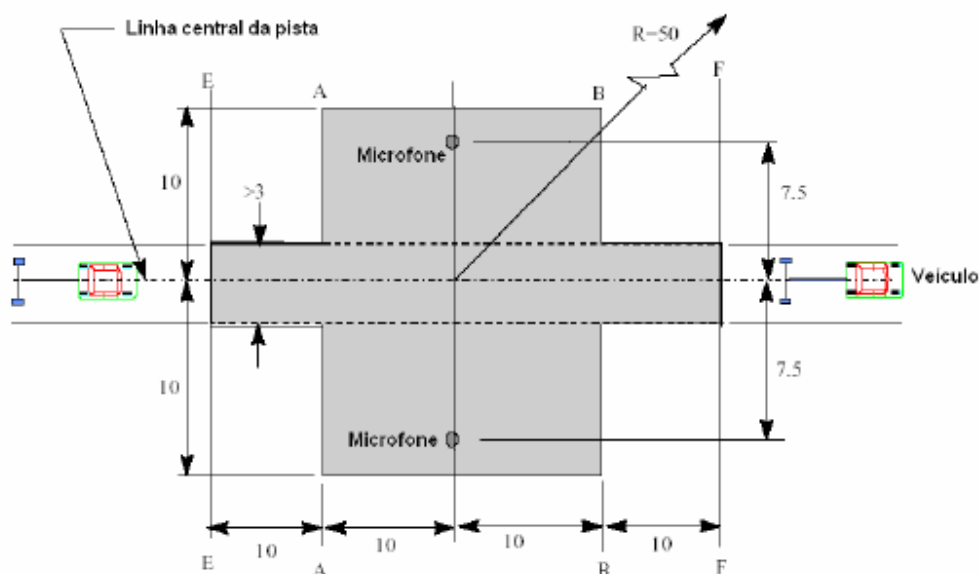
O ruído emitido no contato pneu-pavimento é a fonte predominante de ruído com relação ao ruído total emitido por um veículo para velocidade acima de 50 Km/h. Métodos para a verificação destes níveis de ruído foram criados nas últimas décadas para realizar esta avaliação. A procura pela quantificação dos níveis de ruído de rolagem emitidos pelos veículos teve ensejo com as regulamentações para as emissões máximas de ruído de rolagem, formalizadas a princípio na Europa, mas que teve sua difusão em países da América do Norte como Canadá e Estados Unidos e países da Ásia como o Japão. Dois procedimentos são utilizados atualmente para as medições dos ruídos em campo:

- Medições no campo distante ou também chamado de medições laterais, onde se posicionam os microfones na lateral da via para se verificar o ruído emitido pelos veículos.
- Medições no campo próximo ou também chamado de técnica *close-proximity* de medição dos níveis de ruído, onde se posicionam microfones próximos à área de interface pneu-pavimento.

2.5.1 Medições no campo distante ou medições laterais dos níveis de ruído

Para os estudos de quantificação do ruído pelo conceito de campo próximo ou medições laterais utilizam-se três métodos: *statistical by-pass*, *controlled by-pass* e ruído do tráfego quantificado pelo método *time-averaged*. Para todos estes procedimentos, a medição consiste em colocar os microfones a uma distância pré-determinada do trajeto do veículo na lateral da via. Para fins de pesquisa utilizam-se com mais frequência o *statistical by-pass* (SBP) e o *controlled by-pass*. Para os casos envolvendo estudos do ruído de tráfego em conjunto com projetos de alargamento de vias utiliza-se o método *time-averaged*.

O método *statistical by-pass* é executado posicionando-se os microfones a uma distância determinada perpendicular ao eixo da via e a uma altura determinada sobre a via, ou seja, verifica-se a posição do microfone quanto a horizontal e a vertical. A distância horizontal utilizada nas medições realizadas em países europeus é de 7,5 m perpendicular ao eixo da via e a distância vertical é de 1,2 m acima do eixo da via. Em outros países como os EUA as distâncias de medição são respectivamente na horizontal e vertical, 15,0 m do eixo da via e 1,5 m para acima do eixo. O número de veículos verificados caracterizam os níveis de ruído medidos, na Europa este número é de 180 veículos, sendo 100 automóveis de passeio e 80 veículos com eixo duplo ou multi-eixos, já nos EUA não há uma especificação para o número de veículos. A figura 2.24 mostra o layout para as medições com o SBP.



As seções de estrada utilizadas para as medições dos níveis de ruído devem ter trechos retos e nivelados. Existe um limite para os ruídos de fundo, em torno de 10dB (A) menor que o ruído emitido pelo veículo, e nenhuma superfície reflexiva acusticamente deve estar dentro da área de medição dos microfones, é estipulada esta distância mínima da área de medição, como sendo de 9,0m. Além disso, devem ser tomados cuidados com relação às condições atmosféricas, principalmente com relação à velocidade e direção do vento. As medições são efetuadas com a passagem do veículo a velocidade constante na zona de teste, o método *statistical by-pass* requer que o ruído de somente um veículo seja medido por vez com um sistema como o medidor de nível sonoro (SLM), a velocidade e o tipo de veículo são registrados. Os dados obtidos são computados e calcula-se o *statistical by-pass index* (SBPI). Como, de acordo com o método, deve ser realizada a medição do ruído emitido por um veículo apenas por vez, este método não pode ser utilizado para altos volumes de tráfego nem para vias com várias pistas. Assim, se a mesma variedade de veículos for utilizada para outra medição os resultados serão diferentes devido à diferença dos pneus dos veículos. Com isso este método limita-se ao estudo comparativo de diferentes tipos de pavimentos com relação ao ruído. Pode-se afirmar que este método é trabalhoso e intensivo, mas produz os melhores resultados para avaliar o impacto do ruído do tráfego as vizinhanças de rodovias. A figura 2.25 mostra uma medição típica do método SBP.



Figura 2.25 –Medição de ruído de rolagem típica com o SBP (SQDH, 2004).

Para as medições com o método *controlled by-pass* a configuração é a mesma que para as medições com o método *statistical by-pass*, a diferença principal é que somente alguns veículos dirigidos a velocidade controlada serão verificados quanto as emissões de ruído. Alternativas de pavimento são comparados para cada veículo a uma dada velocidade. Para este método não existem especificações nos Estados unidos. Na União Européia está sendo desenvolvida uma norma possivelmente através da ISO, baseada na norma francesa. O método *controlled by-pass* é menos demorado que o método SBP, mas não leva em conta as variações de medição que podem ocorrer em veículos do mesmo tipo. As limitações quanto às seções que devem ser utilizadas para as medições são as mesmas que para o método *statistical by-pass*, além disso, deve haver condições de tráfego baixo, o que torna sua utilização mais viável em vias rurais ou em condições pistas de teste.

Para as condições de alta densidade de tráfego, não são aplicáveis os métodos anteriores para a avaliação do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento, pois os veículos nas condições de alta densidade de tráfego não ficam suficientemente isolados. Para tais aplicações lança-se mão do método de medição de ruído do tráfego chamado de *time-averaged*. Neste método calcula-se a média das pressões sonoras medidas e converte-se esta média em um nível de pressão sonora equivalente (L_{eq}).

O local para se executar as medições não deve possuir um terreno com inclinações nem apresentar reflexões acústicas significativas, além disso, o ruído de fundo deve ser menor que o ruído do tráfego em pelo menos 10dB(A). Juntamente com as medições dos níveis de ruído, velocidades dos veículos e “mix” de tráfego, são realizadas medições das condições atmosféricas. O método *time-averaged* é o melhor método quando se busca verificar os níveis de emissão de ruído de rodovias que tiveram mudanças em suas características.

2.5.2 Medições no campo próximo ou método de medição *close-proximity*

O método *close-proximity* (CPX) foi desenvolvido para medir os níveis de ruído próximos à interface pneu-pavimento. O pneu de teste é montado em um trailer que é rebocado por um automóvel. Junto ao pneu de teste é posicionado um ou mais microfones, a distância entre o pneu e o microfone é de cerca de 30 cm. Os níveis de ruído de rolagem são medidos e gravados, o valor do ruído emitido durante a rolagem é uma média de valores registrados sobre um determinado período de tempo. Em geral estes valores giram em torno de 4 a 60 segundos. A figura 2.26 mostra uma medição com este sistema na Suécia.



Figura 2.26 –Medição do ruído gerado pelo contato pneu-pavimento com o trailer (SQDH, 2004).

O método de medição dos níveis de ruído de rolagem com o trailer começou na Europa, hoje a maioria dos países europeus dispõe deste sistema para medições em campo. Várias configurações

de montagem de trailers são encontradas na bibliografia, mas todas têm em comum o enclausuramento do pneu de teste, que serve para isolar o ruído externo advindo de outros veículos e também isolar do ruído produzido pelo vento. Neste método o ruído medido fica no campo próximo. A figura 2.27 mostra o espectro de frequência obtido pela medição do ruído na interação contato pneu-pavimento com o método CPX a 72 Km/h, para três tipos diferentes de camada de superfície.

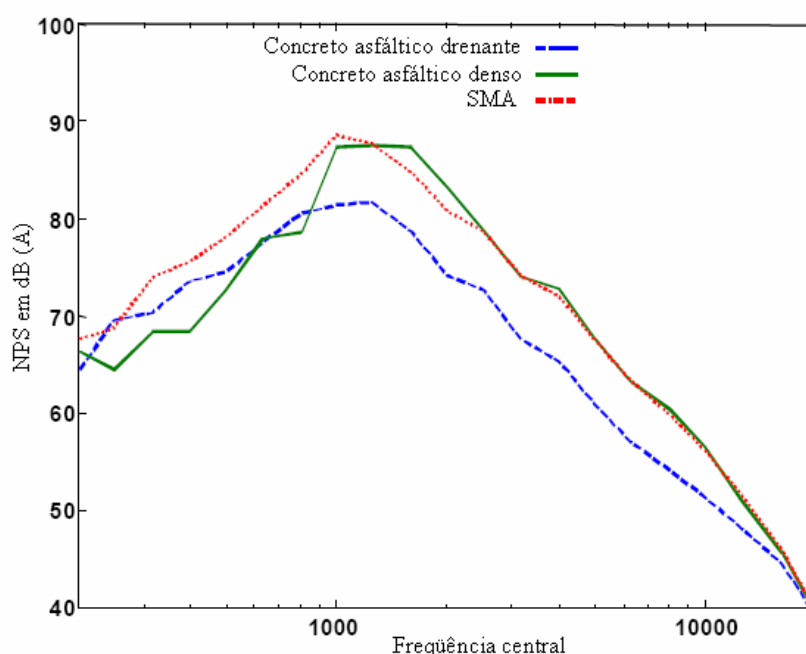


Figura 2.27 – Espectro de frequência (1/3 de oitava) obtido com a medição pelo método CPX a 72 Km/h para três diferentes tipos de camada de superfície (SQDH, 2004).

A medição com o método CPX pode ser realizada de uma maneira relativamente rápida, pode-se utilizar este método para a monitoração do ruído de determinada via ou rede de vias, entretanto o método utiliza um jogo limitado de pneus e apenas um peso de veículo é verificado, dessa forma a variação dos tipos de veículos que ocorre em um determinado corredor de tráfego não é lavada em conta. Correlações com as medições de ruído executadas pelos métodos anteriores requerem a caracterização do trajeto do som que se propaga entre o pneu e a posição de medida lateral do ruído. Para vias com pavimentos que possuem como característica a absorção sonora estes efeitos podem ser significativos.

Existe ainda um método de medição em campo chamado de *close proximity sound intensity* (CPSI) que é considerado nos dias de hoje o mais sofisticado. Este método mede o nível de intensidade sonora (definida como a quantidade de energia por unidade de área), e é capaz de resolver o problema da propagação da componente do som no campo próximo a fonte. As medições com o método CPSI é similar ao método CPX. A ponta de prova que mede a intensidade sonora é montada próxima ao pneu como mostra a figura 2.28. Nas medições com este método, não é necessário proteger a ponta de prova contra o ruído produzido pelo vento. As medições podem ser realizadas em vias com tráfego e a velocidade normal. Podem ser realizados estudos sobre as condições de um determinado trecho de pavimento e variações de um determinado pavimento com relação ao nível de intensidade sonora medidos. Em geral o dispositivo de medição é montado em poucos veículos, dessa forma, assim como o método CPX, o método CPSI não captura as variações típicas de veículos comuns a um corredor de tráfego.



Figura 2.28 – Detalhe do posicionamento da ponta de prova para o método CPSI (SQDH, 2004).

2.6 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE PAVIMENTOS

O coeficiente de absorção sonora α como já descrito nesta revisão da literatura, pode ser definido como a fração de energia sonora absorvida por um determinado material quando uma onda sonora incide sobre sua superfície. Geralmente é dependente da frequência do som considerado (ou do seu espectro quando o som não é um som puro) e do ângulo de incidência da

onda sonora. O coeficiente de absorção sonora de uma superfície de um pavimento é normalmente avaliado para condição de incidência normal de ondas planas.

As correlações entre as medições do coeficiente de absorção sonora de um pavimento e o desempenho deste pavimento como redutor de ruído, de uma forma geral, tem mostrado que superfícies de pavimentos mais absorventes tendem a diminuir o ruído total emitido tanto pelo chamado trem de força do veículo quanto o ruído gerado pelo contato pneu-pavimento. Os métodos atuais de medição de absorção sonora de pavimentos incluem:

Medições da **impedância acústica** e **coeficiente de absorção sonora** de corpos de prova em laboratório para incidência normal de ondas sonoras, de acordo com as normas ASTM E-1050 ou ISO 10534 partes 1 e 2;

Medições das **propriedades acústicas de pavimentos**, com incidência normal de ondas sonoras “*in situ*” de acordo com a norma ISO 13472-1;

Medições do **coeficiente de absorção sonora** em câmara reverberante de acordo com a norma ISO 354;

Medições do **coeficiente de absorção sonora** de pavimentos com o “Guard Tube Method” (Método do tubo guarda), que está sendo desenvolvido atualmente pela ISO (norma 13472-2:2005 e 13472-3:2005).

2.6.1 Medições do coeficiente de absorção sonora com o tubo de impedância ou de Kundt

O princípio básico deste método assume que as dimensões laterais de um tubo são pequenas em comparação com o comprimento de onda do sinal acústico. Neste caso, somente ondas planas se propagam no interior do tubo. A amostra é colocada em uma extremidade do tubo e é submetida a uma frente de ondas com incidência normal. O coeficiente de absorção α é derivado da troca dos nós da onda estacionária na presença da amostra. Duas variantes deste método são apresentadas na ISO 10534-1 e pela ISO 10534-2, de 1998.

Em geral, este ensaio é utilizado para o desenvolvimento de materiais absorventes, e limita-se a aplicação de ondas planas incidindo na direção normal a superfície da amostra a ser ensaiada. A medição do coeficiente de absorção sonora com o tubo de impedância apresenta boa repetibilidade e garante resultados precisos (figura 2.29).

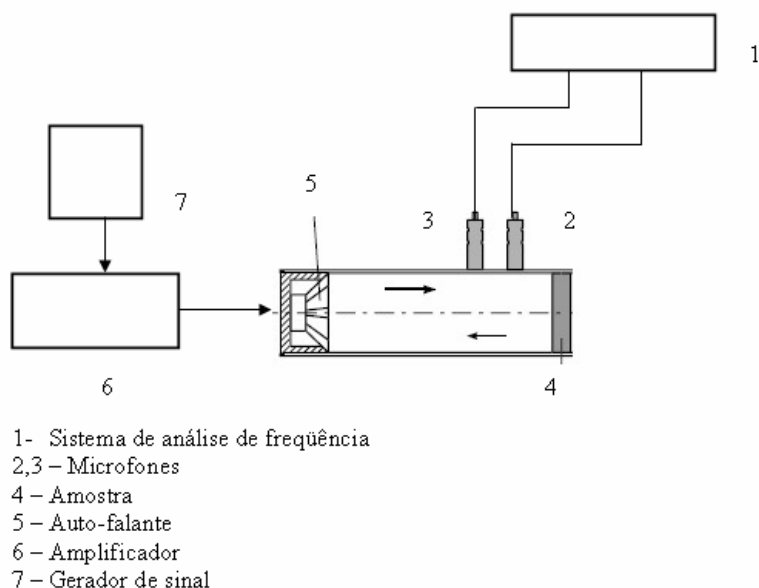


Figura 2.29–Esquema de medição do coeficiente de absorção sonora em laboratório (LÁO, 2004, modificado pelo autor).

A utilização do método de ensaio com o tubo de impedância para verificação coeficiente de absorção sonora de superfícies de pavimento é recomendada para qualificar pistas de medição de níveis de emissão de ruídos de veículos em aceleração. De acordo com a ISO 10844 as amostras a serem ensaiadas são retiradas através de recorte da pista ou sondagens no diâmetro do diâmetro do tubo de impedância a ser utilizado. O ajuste das amostras dentro do tubo de impedância é relatado na bibliografia como uma fonte de erro neste ensaio, portanto necessita-se de cuidado no recorte e manuseio da amostra a ser ensaiada para garantir a precisão dos resultados.

2.6.2 Medições das propriedades acústicas de ondas sonoras com incidência normal in situ

A fonte sonora é direcionada diretamente para a superfície de pista a ser ensaiada, emitindo-se um campo sonoro incidente de ondas esféricas. A reflexão oriunda de parte da superfície e o

campo incidente são captados e separados para o cálculo da absorção. Neste método se pode variar o ângulo de incidência e também incidir as ondas na direção normal a superfície, com isso pode-se comparar os resultados com os obtidos no ensaio com o tubo de impedância. Para o ensaio “in situ” a área a ser ensaiada é mais extensa que para o ensaio com o tubo de impedância, mas os cuidados tomados para a realização do ensaio são menos complexos. A figura 2.30 mostra o esquema de medição deste ensaio.

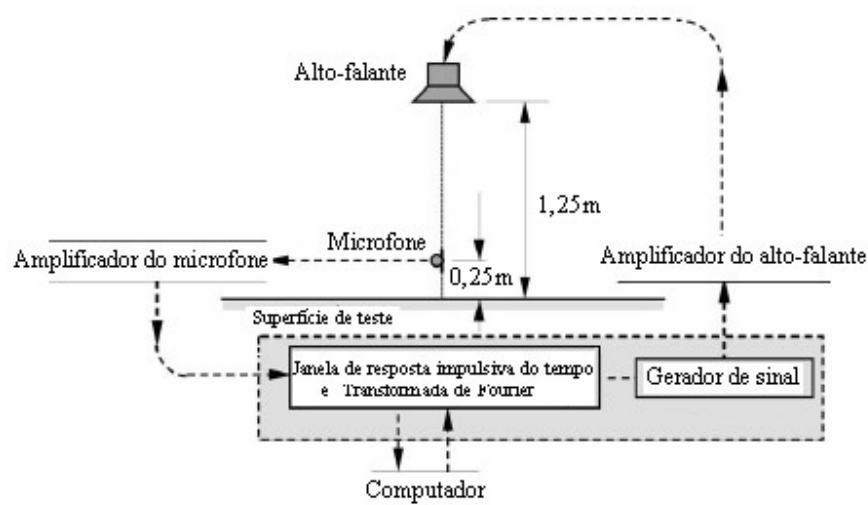


Figura 2.30 –Esquema de medição do coeficiente de absorção sonora in situ (MORGAN, 2003).

2.6.3 Medições do coeficiente de absorção sonora em câmara reverberante

As medições ocorrem em ambiente de laboratório, em câmara reverberante, sobre hipótese de campos sonoros difusos. As características de absorção do material a ser testado é embasado na teoria do comportamento do som em recintos fechados. Com relação à utilização deste método de ensaio para medição do coeficiente de absorção sonora de superfícies de pavimentos, o método torna-se inviável, pois necessitaria a construção de seção ou seções de pista dentro de uma câmara reverberante.

2.6.4 “Guard Tube Method” ou Método do tubo guarda

Este método pode ser entendido como uma adaptação do método do tubo de impedância, mas com aplicação direta em campo. O sistema de medição possui dois tubos, um é externo usado para isolar o tubo interno de medição. O equipamento é colocado diretamente sobre a superfície a qual se quer verificar o coeficiente de absorção sonora α . As características operacionais do tubo são as mesmas aplicadas pelo método do tubo de impedância em laboratório. As medições da resposta impulsiva são executadas por um microfone. Através de uma janela de tempo, as contribuições tanto do sinal acústico incidente quanto do sinal acústico refletido são separadas e então o coeficiente de absorção sonora é calculado. A figura 2.31, abaixo, mostra o esquema de medição.

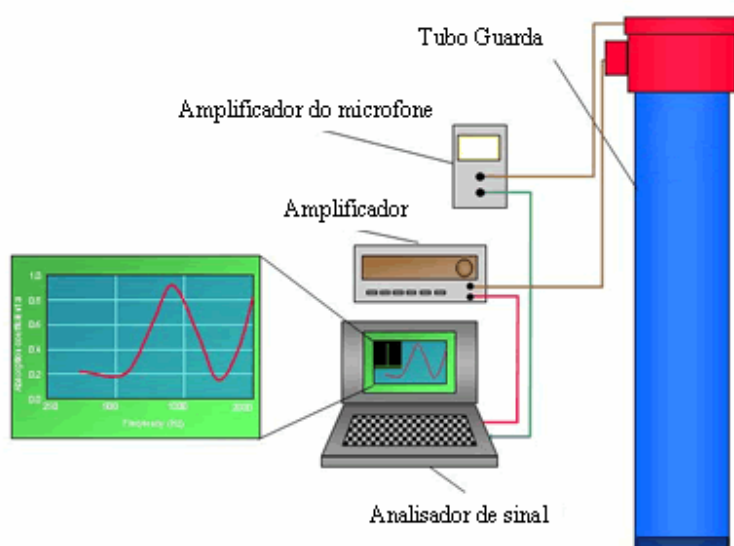


Figura 2.31 – Esquema da medição da absorção de superfícies de pavimento com o “Guard Tube Method” (Método do tubo guarda) (www.silentroads.nl).

O diâmetro do tubo utilizado internamente é de 5,25 cm, a faixa de frequência de operação é de 250 a 2000 Hz. Este método de verificação da absorção sonora de pavimentos não produz danos à superfície da estrada, sendo, portanto um método prático para execução in “situ”, necessitando para isso apenas um desvio do tráfego nos pontos de medição.

A homogeneidade de uma camada asfáltica executada e a composição da superfície da rodovia podem ser investigadas através do desempenho das mesmas quanto à absorção sonora. Isto é conseguido, quando se ensaia a absorção, vários pontos ao longo do trecho executado. Isto possibilita, por exemplo, comparar o índice de poluição de superfícies porosas com medidas de pistas de teste ou para verificação de resultados esperados quanto à absorção predita por modelos de cálculo. A figura 2.32 a seguir, mostra a execução deste sistema de medição em campo.



Figura 2.32 -Execução da medição da absorção de superfícies de pavimentos com o “Guard Tube Method” (Método do tubo guarda) (www.silentroads.nl).

Seguindo este mesmo princípio o trabalho de Arenas et al (2005), mostra a utilização de placas de concreto asfáltico confeccionadas em laboratório para a verificação do coeficiente de absorção sonora para diferentes configurações de superfícies de pavimento. Variou-se neste trabalho a granulometria e as espessuras empregadas para a confecção de placas de concreto asfáltico. Nesta pesquisa o tubo de impedância foi montado verticalmente sobre a superfície da placa de concreto asfáltico e para quatro posições diferentes sobre a placa, determinou-se o coeficiente de absorção sonora (valor médio). Na execução do ensaio tomou-se o cuidado de utilizar materiais na área de

contato entre a placa de concreto asfáltico e o tubo de impedância que garantissem ou minimizassem da melhor forma possível à possibilidade de vazamento da onda sonora emitida nesta região, pois acontecendo este vazamento o coeficiente de absorção sonora medido teria um valor maior.

2.7 MEDIÇÕES DOS NÍVEIS DE RUÍDO EM LABORATÓRIO COM CILINDROS DE ROLAGEM

No desenvolvimento de pneus, realiza-se em laboratório a caracterização de todos os parâmetros mecânicos envolvidos para a concepção do pneu, incluindo emissões de ruído, durabilidade e resistência ao atrito. Isto é realizado com os chamados tambores ou cilindros de rolagem. Estes cilindros são construídos com o máximo diâmetro possível, para dessa forma, simular a condição mais próxima da real possível. São colocados em torno do cilindro seções permutáveis de réplicas de superfícies de pavimentos a serem testados, para dessa forma proceder ao levantamento das emissões de ruído de rolagem. Pode-se também, variar o carregamento aplicado. Os diâmetros desses cilindros para avaliação do ruído variam de 1 a 15 m e a velocidade de rolagem pode chegar a 50 Km/h. Uma limitação verificada é que as forças centrífugas limitam o uso deste equipamento para velocidades maiores. A figura 2.33 mostra o detalhe da configuração de um ensaio com este sistema.



Figura 2.33–Detalhe da disposição dos microfones para a medição dos níveis de ruído de rolagem emitidos, utilizando cilindro com características da superfície em campo (SQDH, 2004).

2.8 PADRONIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO NPS E DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA

Com relação à performance de superfícies de pavimento ao ruído baseado em medições com veículos, dois métodos podem ser considerados padrão, são eles o SPB e o CPX. O SPB é padronizado pela ISO 11819-1 de 1997, e atualmente está em revisão. O método CPX esteve em desenvolvimento durante vários anos, sendo proposto pelo comitê ISO a norma 11819-2 de 2000.

Os métodos auxiliares para a caracterização acústica de superfícies de pavimentos possuem padronização somente com relação à verificação da textura e absorção sonora. Ainda não existem normas aplicáveis para a verificação da rigidez das superfícies de pavimentos. Quando começaram os estudos da verificação do ruído produzido pelo contato pneu-pavimento, no Reino Unido, na década de 70, a macrotextura foi o primeiro parâmetro a ser verificado. Suspeitava-se que este parâmetro era o principal agente na produção do ruído gerado. Naquela época a macrotextura era medida com o ensaio de mancha de areia, com este parâmetro determinava-se então a profundidade média da textura (MTD). Esse ensaio foi utilizado para verificação da resistência a derrapagem e também como auxiliar na caracterização acústica das superfícies. Atualmente utiliza-se na Europa os perfilômetros a laser que analisam diretamente em trânsito qual é a profundidade média do perfil longitudinal (MTD) sendo este ensaio padronizado pela ISO e pelo comitê Europeu de normas com a EN 13472-1 de 2001.

As medições de absorção sonora de pavimentos em câmaras reverberantes podem ser realizadas desde que se tenha uma área de amostragem suficiente dentro da câmara, para isso é utilizada a norma ISO 354:2003 ou a norma europeia EN 20354:1993. Ensaio com corpos de prova para a determinação da absorção sonora através do tubo de impedância são padronizados, como descrito anteriormente, pela normas 10534-1:1996 e 10534-2:1998 da ISO. A busca de métodos práticos para análise da absorção sonora de forma não destrutiva em pavimentos tem sido desenvolvida atualmente. O chamado Método de superfície estendida (“Extended Surface Method”) é padronizado pela norma 13472-1:2002 da ISO. O outro método não destrutivo “in situ”, usado como uma variante do método do tubo de impedância é o chamado “Guard Tube Method”(Método do tubo guarda) que pode ser aplicado diretamente na superfície dos

pavimentos. Existem duas versões deste método sendo desenvolvidas atualmente pela ISO (norma 13472-2:2005 e 13472-3:2005) sendo possivelmente publicadas em 2007.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para alcançar o objetivo proposto de avaliar a absorção sonora de misturas de concreto asfáltico drenante, a pesquisa experimental foi assim executada: A primeira etapa consistiu na definição das curvas granulométricas a serem utilizadas nas misturas asfálticas a partir de trabalhos experimentais já realizados, que tenham demonstrado desempenho adequado quanto a características de vazios comunicantes, de permeabilidade e de deformação permanente. Na segunda etapa, os materiais foram selecionados e caracterizados. Na terceira etapa, as misturas foram preparadas, e compactadas em placas. Na última etapa, as misturas de concreto asfáltico foram ensaiadas a absorção sonora e permeabilidade.

Os materiais usados e os métodos de ensaio para a caracterização dos materiais utilizados, para a fabricação dos corpos de prova de concreto asfáltico e para a execução dos ensaios de absorção sonora e permeabilidade são descritos nos itens a seguir.

3.1 GRANULARES

O desenvolvimento da etapa experimental do trabalho procedeu-se com agregados selecionados de uma pedreira da região da grande Florianópolis. Todos os agregados minerais utilizados tiveram esta mesma rocha de origem; dessa forma, evita-se a dispersão maior de resultados, reduzindo variáveis. O agregado britado nesta pedreira é de origem da suíte intrusiva São Pedro de Alcântara, constituído de granito de coloração cinza claro e granulação de média a grossa. O processo de britagem desta pedreira é com sistema convencional, com britadores primários de mandíbula e britadores secundários girosféricos.

Os materiais britados foram coletados diretamente dos estoques da pedreira a partir de diversos pontos da pilha de modo a obter uma amostra representativa do material (DNER-PRO 120/97).

Após, o material coletado foi levado para o laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina, onde foi primeiramente, seco ao ar e separado de acordo com sua granulometria, para isso foi utilizado o jogo de peneiras de tamanhos de abertura de 25,4 até 0,075 mm.

Em seguida ao peneiramento, procedeu-se a caracterização dos agregados. Para a confecção de misturas asfálticas drenantes os agregados graúdos devem formar um esqueleto mineral estável e com resistência mecânica adequada, resistência ao desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles em torno de 20 %. O formato dos agregados deve ser o mais cúbico possível e possuir arestas vivas. Além disso, os agregados devem ser limpos o que contribui para a adesão satisfatória com o cimento asfáltico. Os agregados graúdos nas misturas asfálticas drenantes devem possuir ainda boa resistência ao polimento.

3.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

Os cimentos asfálticos utilizados na pesquisa foram o CAP 50-70 modificado por polímero SBS (4 %), CAP 50-70 modificado por borracha moída de pneu (15 %) e CAP 50-70. As características destes cimentos asfálticos podem ser visualizadas nas tabelas 3.1, 3.2 e 3.3.

Tabela 3.1 – Características do CAP modificado por polímero SBS.

Características	CAP 50-70 com 4% de SBS
Viscosidade a 135°C, cps, máx	2500
Viscosidade a 145°C, cps, máx	2000
Viscosidade a 175°C, cps, máx	450
Penetração a 25°C (100g,5s), dmm	50-70
Ponto de Amolecimento, °C	60-75
Ponto de Ruptura Fraas, °C, mín	-15
Intervalo de Plasticidade, °C, mín	75
Índice de Suscetibilidade Térmica, mín	+1
Densidade a 20/4°C	1,00-1,04
Ponto de Fulgor, °C, mín	240
Ductilidade a 25°C, cm, mín	100
Ductilidade a 10°C, cm, mín	90
Recuperação Elástica a 25°C, %, mín	85
Recuperação Elástica a 10°C, %, mín	70
Compatibilidade a 163°C, 2 dias, máx	2
Micromorfologia da dispersão	OK

Tabela 3.2– Características do CAP modificado por borracha moída de pneu (15 %).

Características	AMB 15 %
Viscosidade Brookfield a 135°C, (cp)	3876,7
Viscosidade Brookfield a 155°C, (cp)	1527,8
Viscosidade Brookfield a 175°C, (cp)	704,2
Penetração, (0,1mm)	40,2
Ponto de Amolecimento, °C	60,2
Recuperação Elástica, %	67,2

Tabela 3.3– Características do CAP 50-70.

Características	CAP 50-70
Viscosidade Brookfield a 135°C, (cp)	348,3
Viscosidade Brookfield a 155°C, (cp)	139,2
Viscosidade Brookfield a 175°C, (cp)	66,8
Penetração, (0,1mm)	57,3
Ponto de Amolecimento, °C	47,2
Recuperação Elástica, %	3,7

As informações referentes às características dos CAPs, foram fornecidas pelos fabricantes (CAP 50-70, CAP 50-70 com 4 % de SBS fornecido pela Ipiranga Asfaltos e CAP 50-70 com AMB 15% fornecido pela Greca Asfaltos). A utilização de três tipos de cimento asfáltico é útil para avaliar a absorção sonora destes materiais nas misturas drenantes. Cabe aqui lembrar que a modificação de ligantes asfálticos por polímeros beneficia a mistura asfáltica, com a formação de uma película betuminosa mais espessa no envolvimento do agregado mantendo a mistura mais coesa, além de melhorar a adesividade.

As principais classes de polímeros são os plastômeros e os elastômeros. Os elastômeros possuem componentes que lhes conferem maior caráter elástico em serviço, já os plastômeros possuem caráter plástico. Os elastômeros mais comumente utilizados são: SBS (copolímero de estireno butadieno) e o SBR (borracha butadieno estireno). O plastômero mais comumente utilizado é o EVA (copolímero de etileno acetato de vinila).

3.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS E TEORES DE CAP DA PESQUISA

Para avaliar a absorção sonora foram escolhidas três curvas granulométricas já testadas no trabalho de Meurer Filho (2001), que avaliou as propriedades mecânicas, de vazios comunicantes

e de permeabilidade de misturas drenantes e uma curva granulométrica de mistura densa, utilizada no trabalho de Momm (1998). Desta forma resultaram curvas granulométricas com os seguintes diâmetros máximos: 9,5 mm, 12,5 mm e 19,0 mm para as misturas drenantes e diâmetro máximo de 12,5 mm para as misturas de concreto asfáltico denso. As granulometrias destas curvas são apresentadas nas tabelas 3.4, 3.5 e nas figuras 3.1 e 3.2.

Tabela 3.4. Granulometria das misturas de concreto asfáltico denso (MOMM, 1998).

Mistura densa	
Abertura das Peneiras (mm)	D _{máx} =12,5 mm, n=0,48
	Porcentagem Passante
25,4	100
19,1	100
12,5	100
9,5	87,61
4,75	62,74
2,8	48,63
1,18	32,07
0,6	23,15
0,3	16,58
0,15	11,87
0,075	8,5

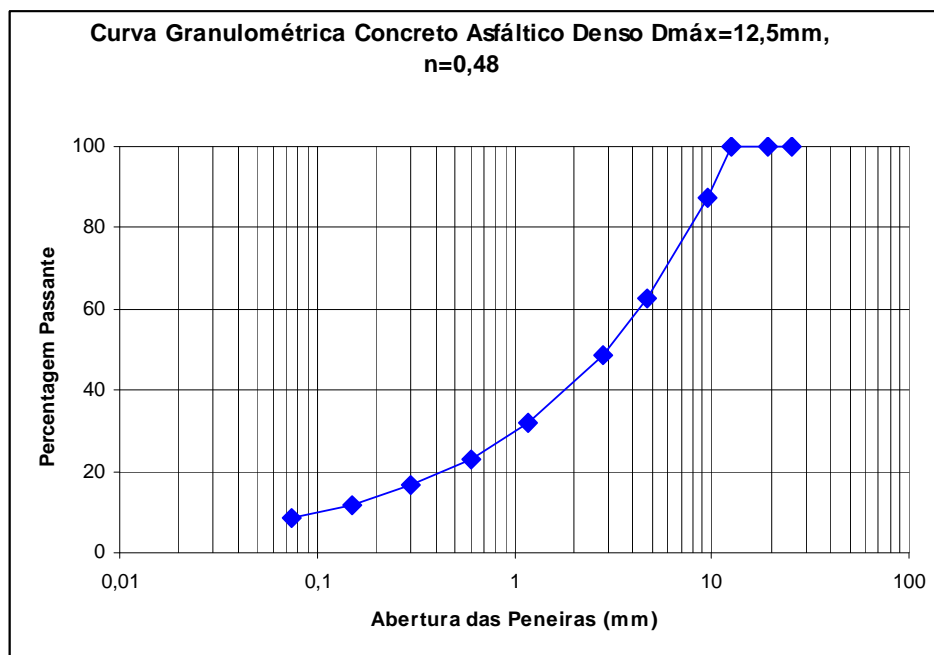


Figura 3.1 – Curva Granulométrica das misturas densas (MOMM, 1998).

Tabela 3.5. Granulometrias da misturas de concreto asfáltico drenante (MEURER FILHO, 2001).

Misturas Drenantes			
Abertura das Peneiras (mm)	Dmáx=9,52, n=0,81 b0/4	Dmáx=12,5, n=0,76 b0/6	Dmáx=19,1,n=0,7 b0/9
	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante	Porcentagem Passante
25,4	100,00	100,00	100,00
19,1	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	38,74
9,5	100,00	57,20	7,80
6,3	38,54	7,77	7,80
4,75	7,71	7,77	7,80
2,8	7,71	7,77	7,80
1,18	7,71	7,77	7,80
0,6	7,71	7,77	7,80
0,3	7,71	7,77	7,80
0,15	7,71	7,77	7,80
0,075	4,36	4,53	4,75

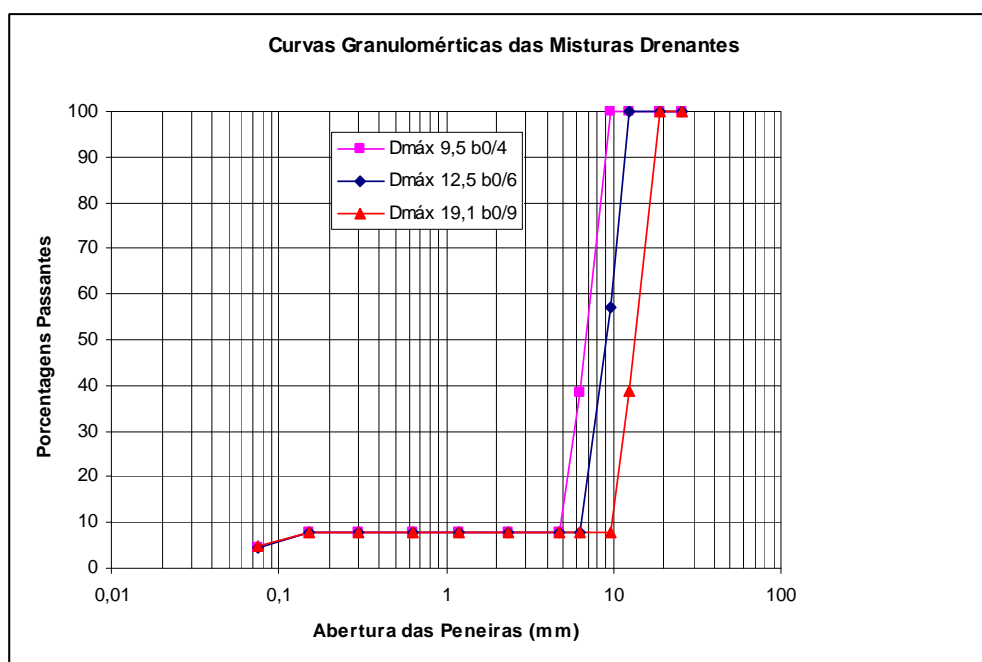


Figura 3.2– Curva Granulométrica das misturas drenantes (MEURER FILHO, 2001).

Os teores de CAP para execução das misturas de concreto asfáltico drenante foram definidas na pesquisa de Meurer Filho (2001), que correspondem, segundo a pesquisa, a bom desempenho quanto à resistência mecânica e maiores valores para vazios comunicantes. E a confecção da mistura densa baseou-se no trabalho de Momm (1998), cujo o teor de CAP escolhido foi aquele que maximizou a resistência mecânica. Com isso ficaram assim definidos os teores de CAP: A mistura densa teve teor de CAP 4,8 %; as misturas drenantes tiveram teor de CAP 4,4 % para as misturas com diâmetro máximo 12,5 e 19,1 mm e teor de CAP de 4,2 % para as misturas com diâmetro máximo 9,5 mm.

3.4 CONJUNTO DE ENSAIOS

Os ensaios realizados nesta pesquisa seguiram a seqüência já descrita no capítulo 1. Foram confeccionadas sete amostras de concreto asfáltico com duas camadas (seis amostras com camada inferior em concreto asfáltico denso e camada superior em concreto asfáltico drenante e uma amostra com camada inferior e superior em concreto asfáltico denso) e uma amostra de concreto asfáltico com três camadas (camada inferior em concreto asfáltico denso e duas camadas em concreto asfáltico drenante).

3.4.1 Fabricação dos corpos de prova

Para a fabricação dos corpos de prova (em placas) de concreto asfáltico, inicialmente os materiais granulares foram separados por peneira, verificando a quantidade em cada peneira por peso. O processo de compactação das placas de concreto asfáltico teve suas peculiaridades devido às dimensões necessárias para a fabricação das amostras. O molde utilizado foi do tipo grande, sendo suas dimensões 500 (largura)x 600 (comprimento) x 200 mm (altura). Os corpos de prova com camada superficial drenante a serem fabricados possuíam duas camadas, uma camada de concreto asfáltico denso com espessura de 6 cm (camada inferior) e uma camada de concreto asfáltico drenante com espessura de 4 cm (camada superior), esta configuração foi executada para 6 corpos de prova. Ainda foram fabricados um corpo de prova com camada superficial drenante, com três camadas, e um corpo de prova com dupla camada de concreto asfáltico denso. O corpo de prova com três camadas possuía a seguinte configuração: uma camada de concreto asfáltico denso de 6 cm (camada inferior) e duas camadas de concreto asfáltico drenante de 4 cm cada uma

(camada intermediária e camada superior), o corpo de prova com duas camadas de concreto asfáltico denso possuía a seguinte configuração: duas camadas de 5 cm (camada inferior e superior). As dimensões utilizadas na fabricação dos c.p.(corpos de prova) foram necessárias para a execução dos ensaios de absorção sonora, buscando-se a configuração de superfície de um pavimento em condições mais próximas da condição real de campo.

O processo de usinagem necessário para a correta homogeneização das misturas asfálticas teve que ser feito em etapas. A capacidade do tacho misturador era de aproximadamente 15 kg, com isso, as camadas de concreto asfáltico denso com peso aproximado de 33,7 Kg foram usinadas em três etapas e as camadas de concreto asfáltico drenante com aproximadamente 20,7 Kg foram usinadas em duas etapas. A figura 3.3 mostra o aquecimento do CAP e preparação do tacho misturador.



Figura 3.3 – Aquecimento do CAP e preparação do tacho misturador.

A usinagem consistiu da mistura dos agregados minerais e o CAP. Para a homogeneização da massa asfáltica a ser compactada, os agregados minerais eram aquecidos previamente a uma temperatura de 180 °C e o CAP era aquecido de acordo com sua especificação ou seja temperaturas de usinagem diferentes de acordo com o ensaio de viscosidade (CAP 50-70, CAP 50-70 4% SBS e CAP 50-70 AMB 15%). O início do processo de usinagem foi realizado com a colocação dos agregados minerais no tacho misturador, enquanto o CAP era aquecido à temperatura determinada pelo ensaio de viscosidade, e assim que a temperatura atingia o valor especificado o mesmo era adicionado ao tacho para a mistura da massa asfáltica. A figura 3.4 ilustra este procedimento.



Figura 3.4 –Aquecimento do CAP à temperatura especificada.

Após a verificação visual da homogeneização da mistura, a mesma era acondicionada em bandejas e colocada em estufa até a preparação da máquina compactadora LCPC. Este procedimento é mostrado na figura 3.5.



Figura 3.5 –Retirada da massa de concreto asfáltico do tacho misturador.

Com a máquina preparada, a massa asfáltica era retirada da estufa e colocada dentro do molde de compactação. Devido à altura do molde de compactação ser maior que as alturas desejadas para

as amostras, no fundo do molde eram colocadas chapas de madeira que completavam a altura total, dessa forma o processo de compactação poderia ser iniciado. A energia de compactação, especificada pela norma Francesa AFNOR NF P-98-250-2 para misturas de concreto asfáltico de superfície, ou seja, revestimentos, é a forte, sendo esta energia, portanto a utilizada no processo de compactação das misturas. A figura 3.6 mostra a mesa compactadora LCPC utilizada na fabricação das amostras.



Figura 3.6 –Mesa compactadora LCPC.

Como descrito anteriormente, foram executados 6 c.p. com camada dupla, ou seja uma camada de 6 cm de concreto asfáltico denso e uma camada de concreto asfáltico drenante de 4 cm. O processo começava com a compactação da massa asfáltica da mistura densa, ao atingir a densificação especificada era colocada sobre esta camada a massa asfáltica drenante e novamente se processava a compactação da segunda camada até a atingir a densificação pré-estabelecida. Para a compactação do c.p. com tripla camada, iniciou-se com a compactação da camada de massa asfáltica densa até a mesma atingir a densificação pretendida, a massa asfáltica necessária para a execução da camada intermediária drenante então era colocada no molde e reiniciava-se o processo de compactação até que se atingisse a densificação necessária, por fim colocou-se a massa asfáltica para a execução da camada de topo e procedeu-se a última etapa de compactação para esta amostra. A execução da compactação do c.p. com dupla camada densa foi realizada de modo similar as demais placas. A tabela 3.6 mostra as configurações dos c.p. fabricados, com relação a espessuras e materiais de mistura.

Tabela 3.6 – Corpos de prova de concreto asfáltico fabricados, espessuras das camadas e materiais de mistura.

		Espessura da camada	Ligante	Ø Máximo dos granulares
Corpo de prova 1	Camada superior: densa	5cm	CAP 50-70	12,5mm
	Camada inferior: densa	5cm	CAP 50-70	12,5mm
Corpo de prova 2	Camada superior: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	12,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70	12,5mm
Corpo de prova 3	Camada superior: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	12,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70 4% SBS	12,5mm
Corpo de prova 4	Camada superior: drenante	4cm	AMB	12,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70	12,5mm
Corpo de prova 5	Camada superior: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	9,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70	12,5mm
Corpo de prova 6	Camada superior: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	9,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70 4% SBS	12,5mm
Corpo de prova 7	Camada superior: drenante	4cm	AMB	9,5mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70	12,5mm
Corpo de prova 8	Camada superior: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	12,5mm
	Camada intermediária: drenante	4cm	CAP 50-70 4% SBS	19,1mm
	Camada inferior: densa	6cm	CAP 50-70	12,5mm

As figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram alguns dos c.p.fabricados.

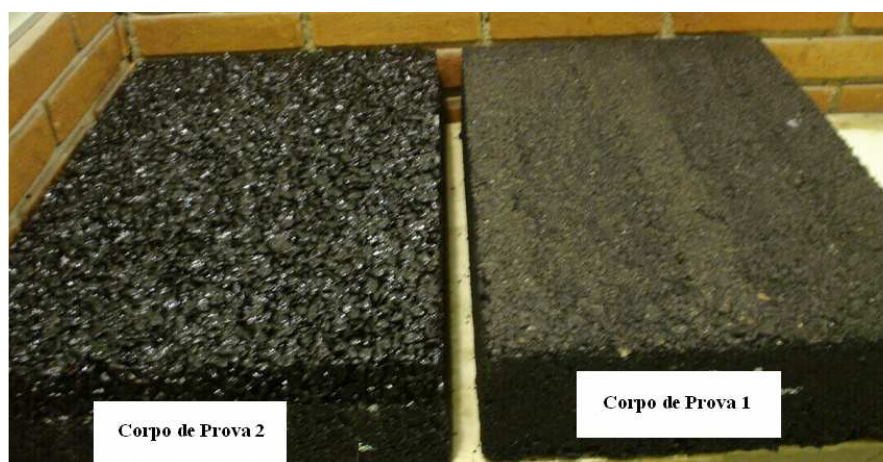


Figura 3.7 – Corpos de prova 1 e 2 compactados.



Figura 3.8 –Corpo de prova 3 compactado.



Figura 3.9 – Corpo de prova 7 compactado.

Algumas considerações devem ser colocadas sobre o processo de compactação. As camadas drenantes, por serem misturas muito abertas, dificultam o processo de compactação com o equipamento LCPC, necessitando, usualmente, de uma chapa de aço para melhorar a trabalhabilidade da mistura. Este procedimento foi adotado para a compactação de todas as misturas drenantes. O processo de fabricação das amostras foi satisfatório. Observou-se uma tendência das misturas apresentarem mais facilidade de aceitar a densificação no centro da amostra do que nas bordas. Este comportamento ocorreu para todas os corpos de prova fabricados.

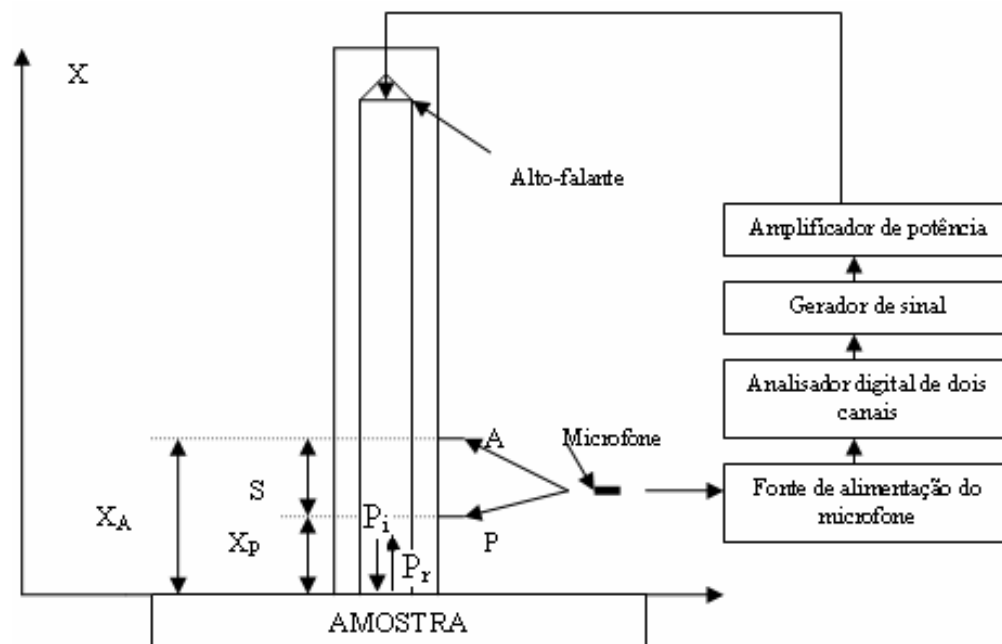
3.4.2 Ensaio de absorção sonora nos corpos de prova de concreto asfáltico

A técnica do ensaio de absorção sonora consistiu em excitar um tubo de impedância com um ruído branco de banda larga e medir a pressão sonora no seu interior, em duas posições pré-determinadas com apenas um microfone para este fim. Os sinais obtidos são processados por analisador digital de frequências, de dois canais, através do qual se determina a curva de absorção sonora em função da frequência. Para o processo de calagem do sistema de medição, o conjunto foi montado inicialmente para a determinação da absorção sonora de uma placa de aço com superfície polida, para verificar, antes do ensaio dos corpos de prova de concreto asfáltico, se o sistema de medição estava fornecendo resultados coerentes (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Ensaio de absorção sonora – detalhe da calagem do sistema de medição sobre placa de aço.

O princípio de operação do sistema de medição da absorção sonora seja no método do tubo de impedância ou método do tubo guarda é o mesmo. O processo de medição é baseado na interação de duas ondas planas; uma incidente e a outra refletida. O esquema da medição é mostrado nas figuras 3.11 e 3.12.



Nas condições assim colocadas, tem-se, no interior do tubo, pressões sonoras que são expressas como função de ondas harmônicas sob forma complexa, que são:

$$\underline{P}_i = A \cdot e^{i(\omega t + kx)} \text{ (Pressão sonora incidente)} \quad (3.0)$$

$$\underline{P}_r = \underline{B} \cdot e^{i(\omega t - kx)} \text{ (Pressão sonora refletida)} \quad (3.1)$$

Onde:

A é a amplitude complexa de pressão sonora de uma onda plana de frequência ω e número de onda k , propagando-se no sentido positivo de x com velocidade c , e \underline{B} é a amplitude da onda propagando-se no sentido negativo de x .

A pressão sonora total no interior do tubo nas posições A e P , é dada por:

$$\underline{P}_P = e^{i\omega t} [A \cdot e^{ikxP} + \underline{B} \cdot e^{-ikxP}] \quad (3.2)$$

$$\underline{P}_A = e^{i\omega t} [A \cdot e^{ikxA} + \underline{B} \cdot e^{-ikxA}] \quad (3.3)$$

A função resposta em frequência ou função de transferência entre os dois sinais obtidos nas posições A e P é dando por:

$$H_{AP} = \frac{\underline{P}_P}{\underline{P}_A} = \frac{[A \cdot e^{ikxP} + \underline{B} \cdot e^{-ikxP}]}{[A \cdot e^{ikxA} + \underline{B} \cdot e^{-ikxA}]} = \frac{[e^{ikxP} + (\underline{B}/A) \cdot e^{-ikxP}]}{[e^{ikxA} + (\underline{B}/A) \cdot e^{-ikxA}]}, \quad (3.4)$$

Com isso o módulo das razões de amplitudes é dado por:

$$|\underline{B}/A| = \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right| \quad (3.5)$$

O coeficiente de reflexão sonora para estas condições pode ser calculado com:

$$\alpha_r = \left| \frac{\underline{P}_r}{\underline{P}_i} \right|^2 = \left| \frac{\underline{B}}{A} \right|^2, \quad (3.6)$$

Considerando que a energia sonora transmitida para fora do tubo é aproximadamente nula, o coeficiente de absorção sonora pode ser determinado da seguinte forma:

$$\alpha = 1 - \alpha_r = 1 - \left| \frac{\underline{B}}{A} \right|^2, \text{ substituindo o valor de } |\underline{B}/A| \text{ na equação 3.5, tem-se:}$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{H_{AP} - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{AP}} \right|^2, \quad (3.7)$$

Com base na equação 3.7, pode-se notar que uma vez definida a distância entre as duas posições de medição, s , pode-se determinar a função resposta em frequência para a obtenção de α . A função de transferência é definida por:

$$H_{AP} = \frac{\underline{P}_P}{\underline{P}_A} = \frac{G_{AP}}{G_{AA}}; \quad (3.8)$$

onde :

G_{AP} é o espectro cruzado de \underline{P}_A e \underline{P}_P , dado por :

$$G_{AP} = (\underline{P}_A^*) \cdot (\underline{P}_P) \quad (3.9)$$

G_{AA} é o espectro cruzado de potência de \underline{P}_A , dado por:

$$G_{AA} = (\underline{P}_A) \cdot (\underline{P}_A^*) \quad (3.10)$$

A equação de H_{AP} , pode ainda ser escrita da seguinte forma:

$$H_{AP} = \frac{(\underline{P}_A^* \cdot \underline{P}_P) \cdot (\underline{S} \cdot \underline{S}^*)}{(\underline{P}_A \cdot \underline{P}_A^*) \cdot (\underline{S} \cdot \underline{S}^*)} \quad (3.11) \quad \text{dessa forma}$$

$$H_{AP} = H_{AS} \cdot H_{SP} \quad (3.12)$$

onde :

* é o complexo conjugado;

$\underline{S}, \underline{S}^*$ é o espectro de potência do sinal do gerador responsável pelo campo sonoro no interior do tubo;

H_{AS} é a função de transferência entre o sinal do microfone na posição A e o sinal do gerador;

H_{SP} é a função de transferência entre o sinal do gerador e o sinal do microfone na posição P .

Supondo que o sinal seja estacionário, H_{AS} e H_{SP} não necessitam ser determinados simultaneamente. Dessa forma um único microfone pode ser usado para medir em seqüência, a pressão sonora nas posições A e P . A função H_{AP} necessária para a quantificação do coeficiente de absorção sonora α é obtido pela equação 3.12, apresentada anteriormente. As figuras 3.13 e 3.14 mostram as medições da pressão sonora nas posições A e P sobre um dos corpos de prova de concreto asfáltico.



Figura 3.13 – Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o c.p. e posição do microfone em A.



Figura 3.14 – Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o c.p. e posição do microfone em P.

A vantagem principal da técnica de determinação do coeficiente de absorção sonora com apenas um microfone é que a curva de absorção sonora determinada é praticamente contínua, em alguns casos a discretização do sinal é da ordem de décimos de Hz, com isso pode-se detectar comportamentos especiais da curva determinada como: ressonâncias, coincidências, etc.

Na determinação do coeficiente de absorção sonora α , deve-se ter o cuidado de se verificar também um parâmetro chamado de função de coerência γ^2 . Esta função possui seu valor variando de 0 a 1 e mede o grau de casualidade entre dois sinais. Para as medições de absorção sonora a função coerência é calculada para verificar a validade da estimativa da função de transferência, H_{AP} , obtida. De acordo com Gerges (1992) *apud* Bodén se o valor da função coerência for baixo, ou seja, próximo de zero, pode haver erros aleatórios significativos na função de transferência, em frequências em que ocorrem os valores baixos da função de coerência. A função de coerência é definida por:

$$\gamma_{AP}^2 = \frac{|G_{AP}|^2}{G_{AA} \cdot G_{PP}} \quad (3.13)$$

Da mesma forma que acontece com a função de transferência, na técnica de um microfone, não é possível a determinação direta da função de coerência, no entanto pode-se escrever:

$$\gamma_{AP}^2 = \frac{|\underline{P}_A^* \cdot \underline{P}_P|^2}{(\underline{P}_A^* \cdot \underline{P}_A) \cdot (\underline{P}_P^* \cdot \underline{P}_P)}, \quad (3.14)$$

Dessa forma:

$$\gamma_{AP}^2 = \gamma_{AS}^2 \cdot \gamma_{SP}^2 \quad (3.15)$$

As funções γ_{AS}^2 e γ_{SP}^2 , são obtidas quando o microfone ocupar as posições A e P .

Cabe aqui ressaltar que o conjunto tubo alto-falante foi montado na posição vertical sobre os corpos de prova de concreto asfáltico e o ensaio foi executado em três pontos distintos sobre o corpo de prova (Figuras 3.15, 3.16 e 3.17). No ensaio convencional a absorção sonora é executada com a colocação da amostra dentro do tubo de impedância.



Figura 3.15 – Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o c.p., primeiro ponto de medição .



Figura 3.16 – Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o c.p., segundo ponto de medição.



Figura 3.17– Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o c.p., terceiro ponto de medição.

Para o posicionamento do tubo de impedância verticalmente sobre os corpos de prova foi adaptado na saída do tubo uma flange de aço. Utilizou-se ainda, massa de vedação na área de contato tubo-placa foi usada para evitar “fuga” de onda sonora durante o ensaio, o que aumentaria o valor do coeficiente de absorção sonora medido (Figuras 3.18 e 3.19).



Figura 3.18 - Detalhe do material vedante na área de contato: flange – superfície do c.p. (parte inferior).



Figura 3.19 - Detalhe do material vedante na área de contato: flange – superfície do c.p. (parte superior)

O alto-falante gera ondas sonoras estacionárias aleatórias que se propagaram no tubo de impedância como ondas planas excitadas por tons puros abaixo da frequência de corte⁵ (f_c).

A frequência de corte do tubo de ondas estacionárias é de 2,078KHz, para o diâmetro do tubo (97 mm), portanto, o limite superior da frequência para esta configuração de tubo é de aproximadamente 2,0KHz. Para possibilitar a medição da pressão sonora em duas posições distintas, foram feitos dois orifícios distantes entre si de 66,0mm, a partir de seus centros, e que acomodaram perfeitamente o microfone de ¼ de polegada e adaptador de ½ polegada, utilizados na medição.

O espaçamento entre as posições do microfone determina a faixa de frequência na qual as medições são aceitáveis, tem-se, portanto:

- para determinação da frequência mínima de trabalho $\rightarrow f_{\min} > \frac{0,1 \cdot c}{2 \cdot S}$; (3.16)

- para determinação da frequência máxima de trabalho $\rightarrow f_{\max} < \frac{0,8 \cdot c}{2 \cdot S}$ e (3.17)

- para determinação da frequência ideal de trabalho $\rightarrow f_{\text{central}} = \frac{c}{4 \cdot S}$. (3.18)

⁵ Frequência de corte $f_c = \frac{1,84 \cdot c}{\pi \cdot d}$, onde c é velocidade do som no ar a 20° C e d é o diâmetro do tubo a ser

utilizado. Abaixo da frequência de corte somente ondas planas se propagam no meio cilíndrico, acima da frequência de corte as ondas sonoras não se propagam como ondas planas, mas sim como ondas laterais ou cilíndricas.

Onde:

c é a velocidade do som no ar a 20°C, que é de 343 m/s e

s é a distância entre os centros dos furos nos quais foi posicionado o microfone.

Como a frequência de corte é de aproximadamente 2KHz (Função do diâmetro do tubo), e como o distanciamento é de 66,0 mm entre os microfones, as frequências mínima, máxima e ideal para as medições são respectivamente: 260 Hz, 2000 Hz e 1300 Hz. Estes valores contemplam a gama de frequências do ruído gerado na rolagem de veículos em campo. As figuras 3.20 e 3.21 mostram respectivamente, a variação das frequências de ensaio em função do diâmetro do tubo e da distância entre as posições do microfone.

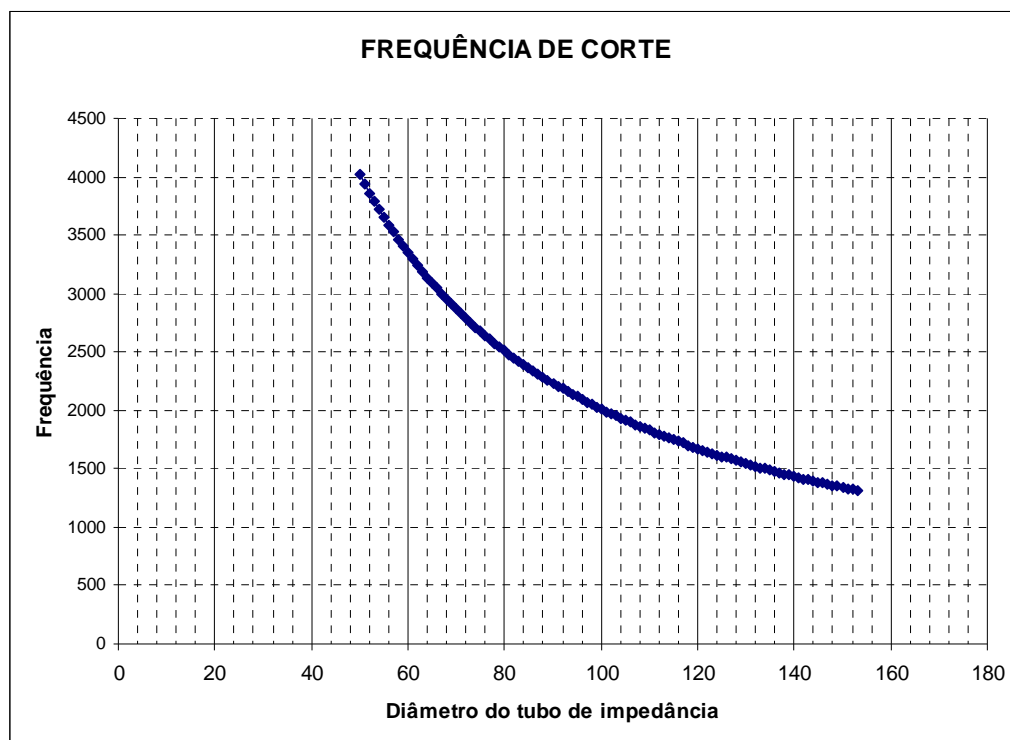


Figura 3.20 - Frequências para o ensaio de absorção sonora, variação da frequência de corte com o diâmetro do tubo de impedância.

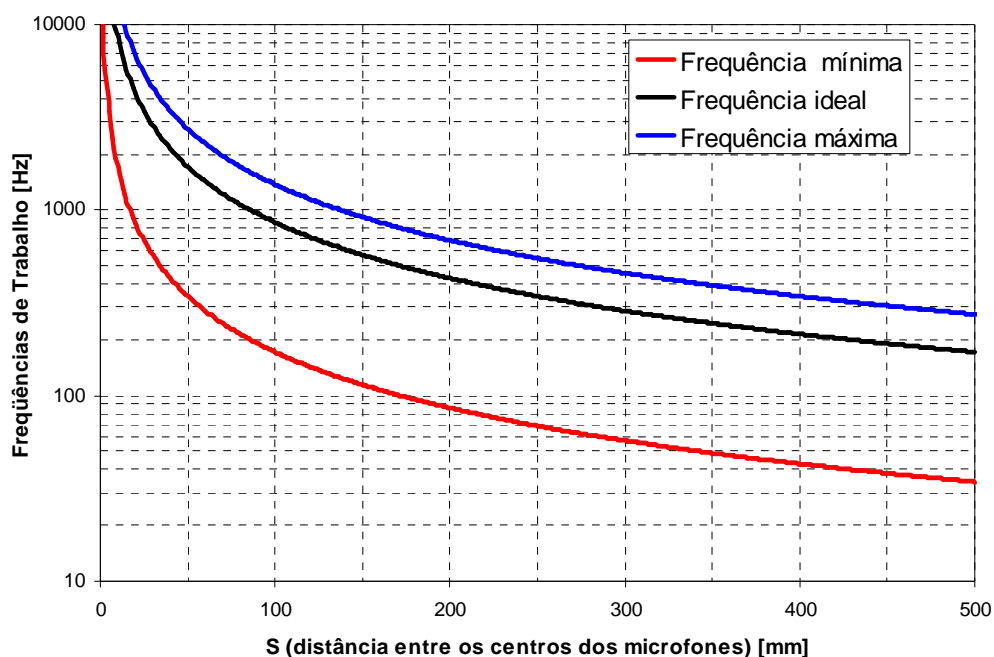


Figura 3.21 - Frequências para o ensaio de absorção sonora: variação das frequências de trabalho, com a distância entre os centros dos microfones.

3.4.3 Ensaio de Permeabilidade das amostras de concreto asfáltico com superfície drenante -Permeâmetro LCS NLT-327/88

A permeabilidade das amostras de concreto asfáltico com superfície drenante foi determinada segundo a norma espanhola NLT-327 de 1988, com equipamento confeccionado no laboratório de pavimentação da UFSC. A norma espanhola prevê a execução do referido ensaio “in situ” para a verificação da permeabilidade de camadas de revestimento executadas com misturas drenantes, mas com a confecção das amostras com dimensões apropriadas pode-se executar o ensaio em laboratório.

Neste ensaio é medido o tempo necessário para a percolação de uma coluna d’água na camada de concreto asfáltico drenante. Devido às dimensões das placas de concreto asfáltico a determinação dos tempos de percolação foram feitos em três pontos distintos, que coincidem com os pontos de verificação da absorção sonora.

O ensaio é executado da seguinte forma: Posiciona-se o equipamento no ponto de ensaio e coloca-se um anel externo de aço para pressionar a borracha vedadora na saída do tubo de acrílico, logo após, se enche o recipiente até que ocorra o transbordamento da água no tubo, para com isso molhar e saturar a zona de medida da permeabilidade. O tubo de acrílico possui uma tampa vedante que no momento da realização do ensaio é retirada. Com isso toma-se o tempo necessário para que o menisco d'água dentro do tubo passe por duas marcas de medição, que delimitam o volume necessário de água para a realização do ensaio. Com os tempos determinados e sabendo a área do orifício de saída inferior calcula-se a velocidade do fluxo d'água nas placas, com a seguinte relação:

$$\text{Permeabilidade} = \frac{V}{A_p \cdot t}, \quad (3.19)$$

Onde:

V - é o volume de água entre os meniscos do cilindro, em cm³;

A_p - é a área do orifício inferior do permeâmetro, pelo qual há o escoamento, em cm²;

t - é o tempo necessário para o volume de água passar entre os meniscos, em segundos.

Este ensaio foi realizado em todos corpos de prova com camada superficial drenante. A figura 3.22 ilustra a execução do ensaio.



Figura 3.22 – Ensaio de permeabilidade sobre corpos de prova com camada superficial drenante.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DOS ENSAIOS

Apresenta-se neste capítulo, os resultados dos ensaios de absorção sonora executados com o tubo de impedância e os resultados dos ensaios de permeabilidade executados com o permeâmetro LCS. O ensaio de absorção sonora foi realizado em todos os corpos de prova fabricados (8 c.p.), enquanto que o ensaio de permeabilidade foi executado nos corpos de prova de concreto asfáltico com camada superficial drenante (7 c.p.).

4.1 Instrumentação e medição da absorção sonora

As medições da absorção sonora foram executadas com o equipamento SignalCalc ACE - Dynamic Signal Analyzer. Este equipamento possui um sistema de aquisição de dados que converte os sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. A figura 4.1 mostra conjunto de equipamentos deste ensaio, e a tabela 4.1 descreve estes equipamentos.

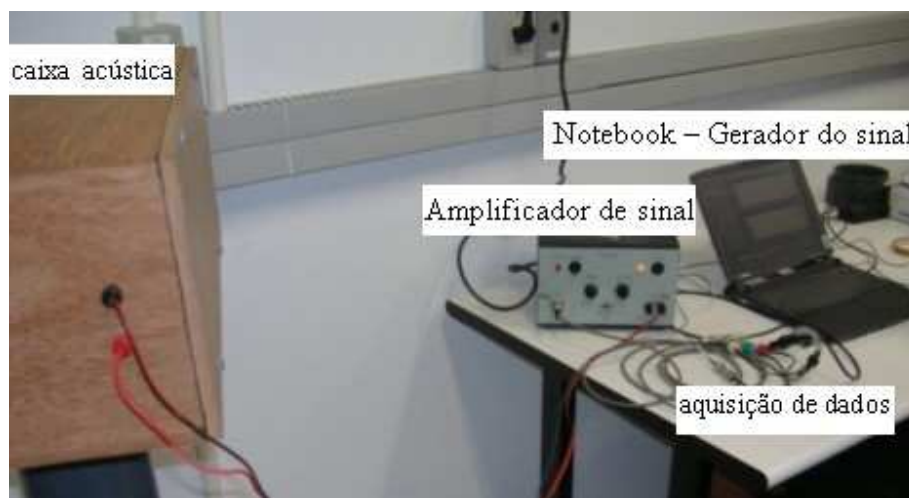


Figura 4.1 – Sistema de medição da absorção sonora - caixa acústica, gerador do sinal, amplificador de sinal, aquisitor de dados e Notebook.

Tabela 4.1 – Lista de equipamentos utilizados no ensaio de absorção sonora.

Equipamento - SignalCalc ACE - Dynamic Signal Analyzer - system nº 6984
Amplificador de potência B&K 2706
Microfone de 1/4" B&K 4944A
1 cabo de força (do amplificador de potência B&K 2706)
1 cabo de força + transformador (do frontend)
1 cabo de força + transformador (do notebook)
1 cabo 2 pinos - 2 pinos para conexão alto-falante - amplificador 2706
1 cabo "bananinha" BNC - conector BNC
1 cabo conector BNC - conector BNC
1 conector BNC em T (3 pontas)
1 conector BNC em I (2 pontas)

Um programa escrito no software Matlab permitiu a exposição gráfica da variação do coeficiente de absorção sonora com a frequência. O programa, também, foi escrito para mostrar a variação dos componentes imaginário e real da impedância normalizada com relação à frequência e mostrar a função coerência do sinal emitido em função da frequência. O software gera um arquivo em formato de texto para cada ponto sobre o corpo de prova (neste ensaio três pontos), e para cada posição do microfone no tubo de impedância. Por exemplo, para o corpo de prova 1, fez-se à execução da medição da absorção sonora no primeiro ponto sobre o c.p. (Pto. 1) com o microfone na posição A (Figuras 4.2 e 4.3).

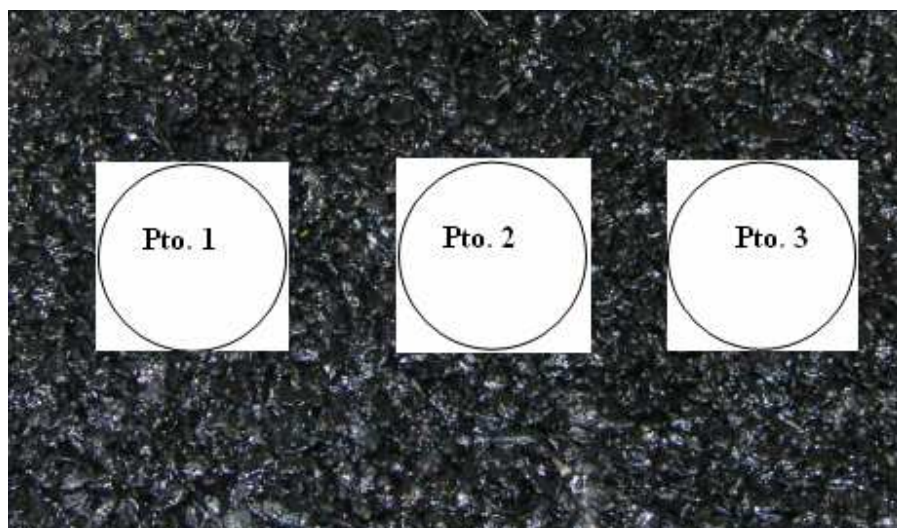


Figura 4.2- Esquema dos pontos de medição sobre os corpos de prova.



Figura 4.3- Ensaio de absorção sonora – detalhe do sistema de medição sobre o corpo de prova , posições do microfone A e P (com microfone em P).

Trocava-se a posição do microfone para a posição *P* e efetuava-se novamente o ensaio no mesmo ponto sobre o corpo de prova. Isto foi executado nos três pontos sobre o corpo de prova. Portanto eram gerados seis arquivos de dados para cada corpo de prova.

4.1.1 Coeficiente de absorção sonora x Frequência

São apresentados graficamente o espectro do coeficiente de absorção sonora (α) em função da frequência⁶, dos três pontos de medição e o valor médio destas três determinações para todos os corpos de prova ensaiados.

A figura 4.4 mostra a variação do coeficiente de absorção sonora α , com a frequência para o **corpo de prova 1**. Observa-se uma grande variação do coeficiente de absorção sonora para baixas frequências, abaixo de 500 Hz, segundo Bóden esta variação deveria ocorrer até 256 Hz que é a frequência mínima de operação. Em todos os c.p. ensaiados, este comportamento a baixas frequências é apresentado. Ao longo da banda de frequências o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,39, tendo um pequena diminuição a 1871 Hz, cujo valor do α médio é 0,33. Para a frequência de 1000 Hz, que é reportada na bibliografia como a frequência onde o incômodo gerado pelo ruído pneu-pavimento é maior, o valor de α é 0,41.

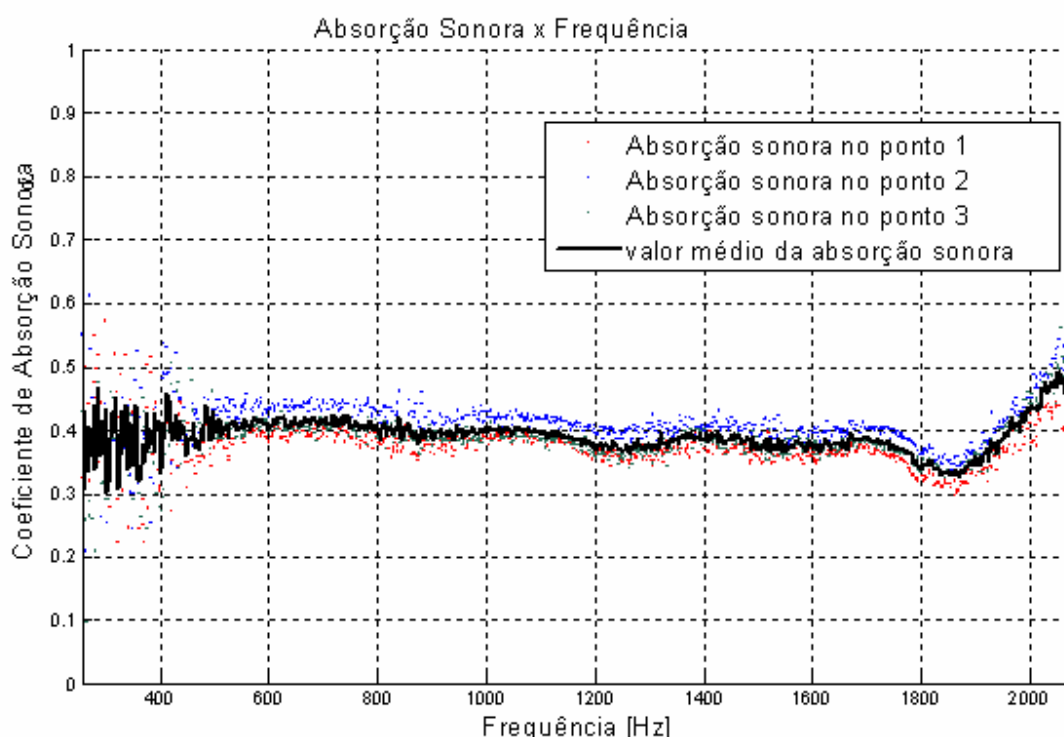


Figura 4.4 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 1.

⁶ A frequência mínima aceitável para a validade das medições é de 260 Hz, a frequência máxima aceitável para a validade das medições é de 2000 Hz. Estes valores limites foram definidos no capítulo 3, item 3.4.2.

Verifica-se para o **corpo de prova 2** (Figura 4.5), um comportamento da curva de absorção sonora próprio de materiais absorventes acusticamente, ou seja, a curva apresenta picos de absorção ao longo da banda de frequências. Os valores médios de α possuem dois máximos, o primeiro a 635 Hz com $\alpha = 0,87$ e o segundo a 1438 Hz com $\alpha = 0,62$. Ao longo da banda de frequências evidenciam-se também, dois valores de mínimo, o primeiro a 926 Hz com $\alpha = 0,52$ e o segundo a 1869 Hz com $\alpha = 0,43$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,56.

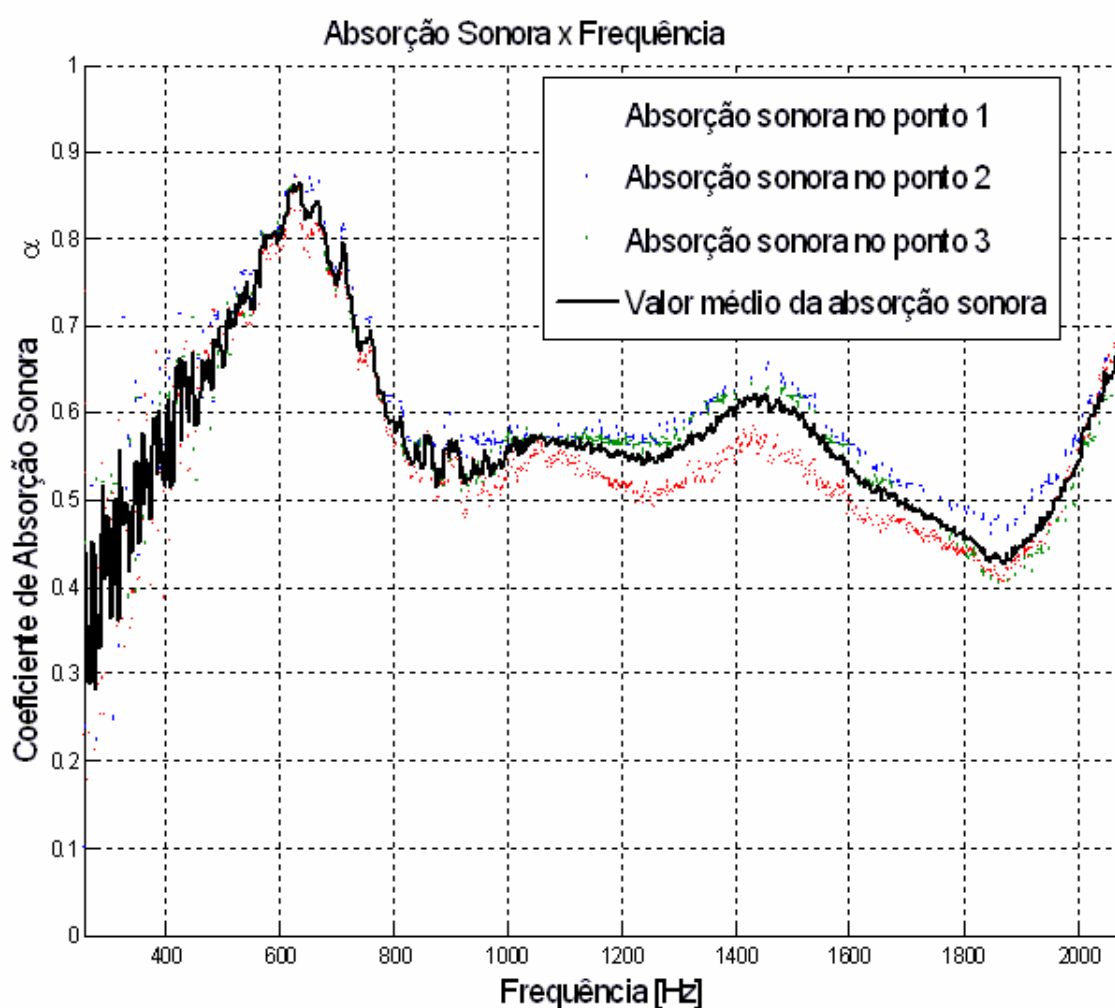


Figura 4.5 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 2.

Para o **corpo de prova 3**, o comportamento da curva de absorção foi semelhante ao verificado para o c.p.2, ou seja, observando-se os valores médios do coeficiente de absorção sonora encontra-se dois picos de absorção ao longo da banda de frequências, o primeiro a 619 Hz com $\alpha = 0,90$ e o segundo a 1111 Hz com $\alpha = 0,61$. O segundo pico de absorção para o c.p. **3** não é tão pronunciado quanto para o c.p. **2**. Ainda, ao longo da banda de frequências evidenciam-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro a 932 Hz com $\alpha = 0,53$ e o segundo mínimo a 1840 Hz com $\alpha = 0,38$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,57.

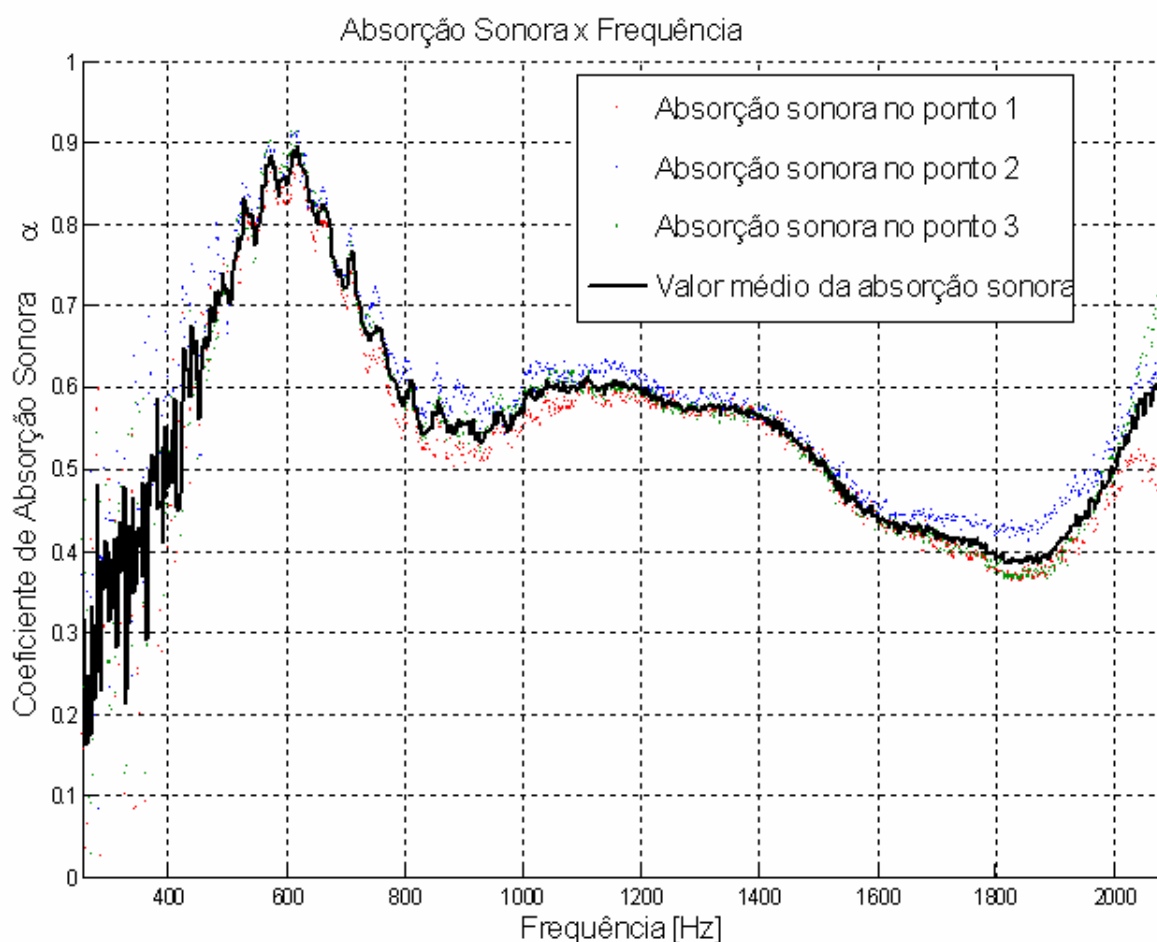


Figura 4.6 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 3.

Observa-se pela figura 4.7, o comportamento da curva de absorção do **corpo de prova 4**, este comportamento é semelhante ao verificado para os c.p. 2 e 3, ou seja, dois picos de absorção ao longo da banda de frequências, o primeiro a 617 Hz com $\alpha = 0,90$ e o segundo a 1088 Hz com $\alpha = 0,64$. Também ao longo da banda de frequências evidenciam-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro a 900 Hz com o valor de $\alpha = 0,57$ e o segundo mínimo a 1832 Hz com o valor de $\alpha = 0,41$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,61.

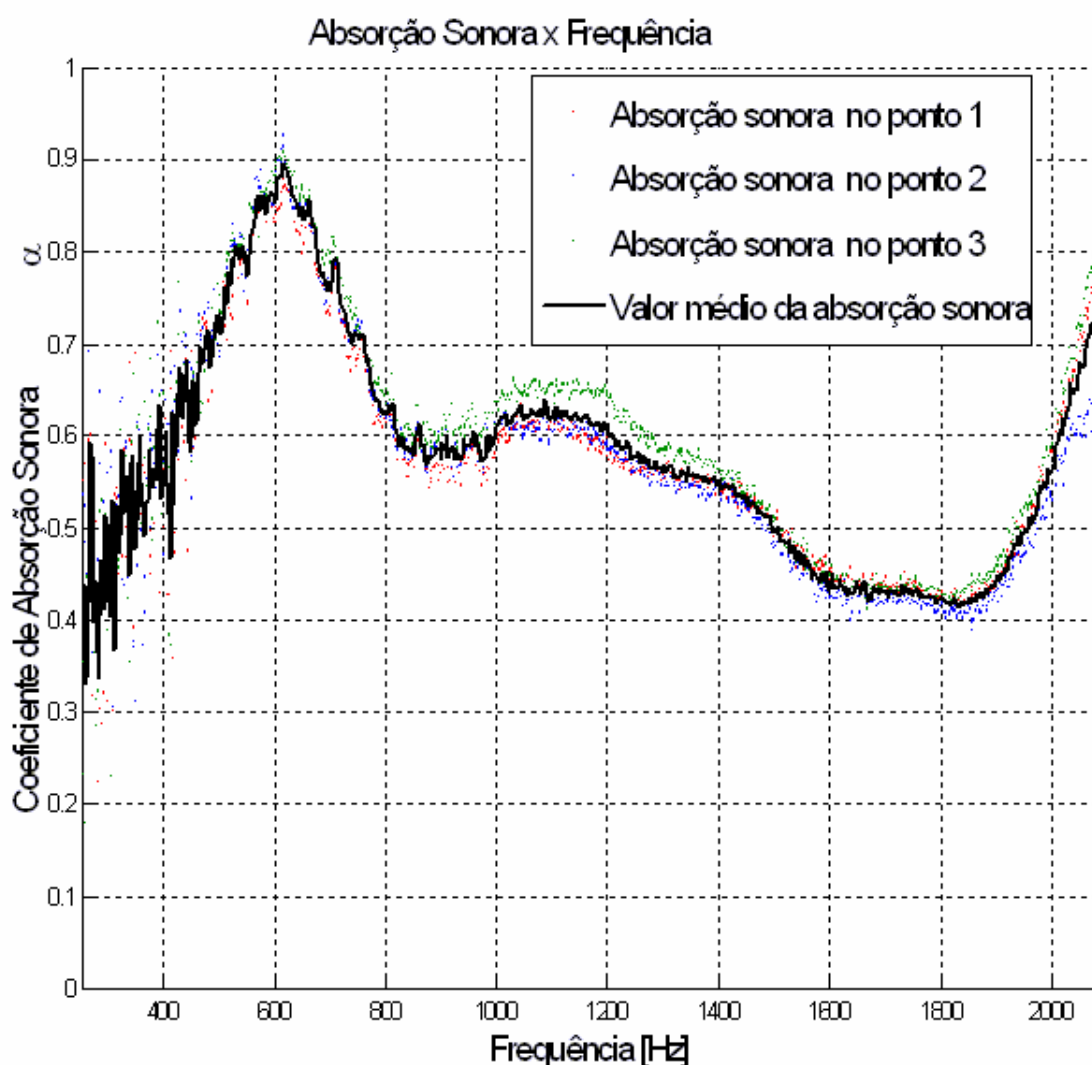


Figura 4.7 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 4.

No gráfico da variação da absorção sonora com a frequência, para o **corpo de prova 5** (Figura 4.8), observando-se os valores médios do coeficiente de absorção sonora encontra-se dois picos de absorção ao longo da banda de frequências, o primeiro a 619 Hz com valor de $\alpha = 0,89$ e o segundo a 1115 Hz com o valor de $\alpha = 0,67$. Também ao longo da banda de frequências evidenciam-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro a 922 Hz com o valor de $\alpha = 0,62$ e o segundo mínimo a 1844 Hz com o valor de $\alpha = 0,41$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,64.

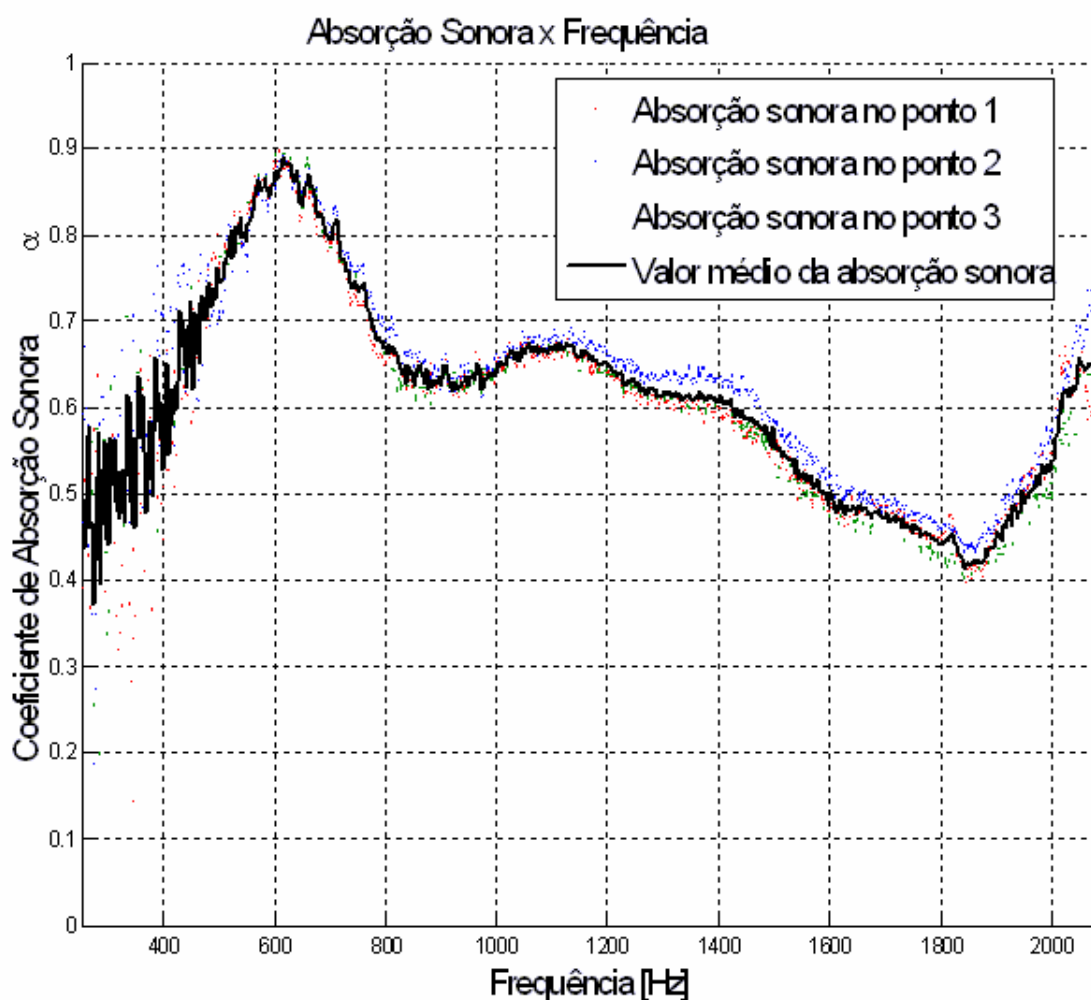


Figura 4.8 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 5.

O **corpo de prova 6**, apresentou comportamento da curva de absorção com a frequência semelhante ao verificado para os c.p. anteriores, ou seja, observando-se os valores médios do coeficiente de absorção sonora encontra-se dois picos de absorção ao longo da banda de frequências, o primeiro a 613 Hz com valor de $\alpha = 0,90$ e o segundo a 1061 Hz com o valor de $\alpha = 0,68$, cabe frisar que este segundo pico de absorção para este c.p. não foi tão pronunciado quanto para os outros c.p.. Também ao longo da banda de frequências evidencia-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro a 927 Hz com o valor de $\alpha = 0,62$ e o segundo mínimo a 1859 Hz com o valor de $\alpha = 0,43$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,65.

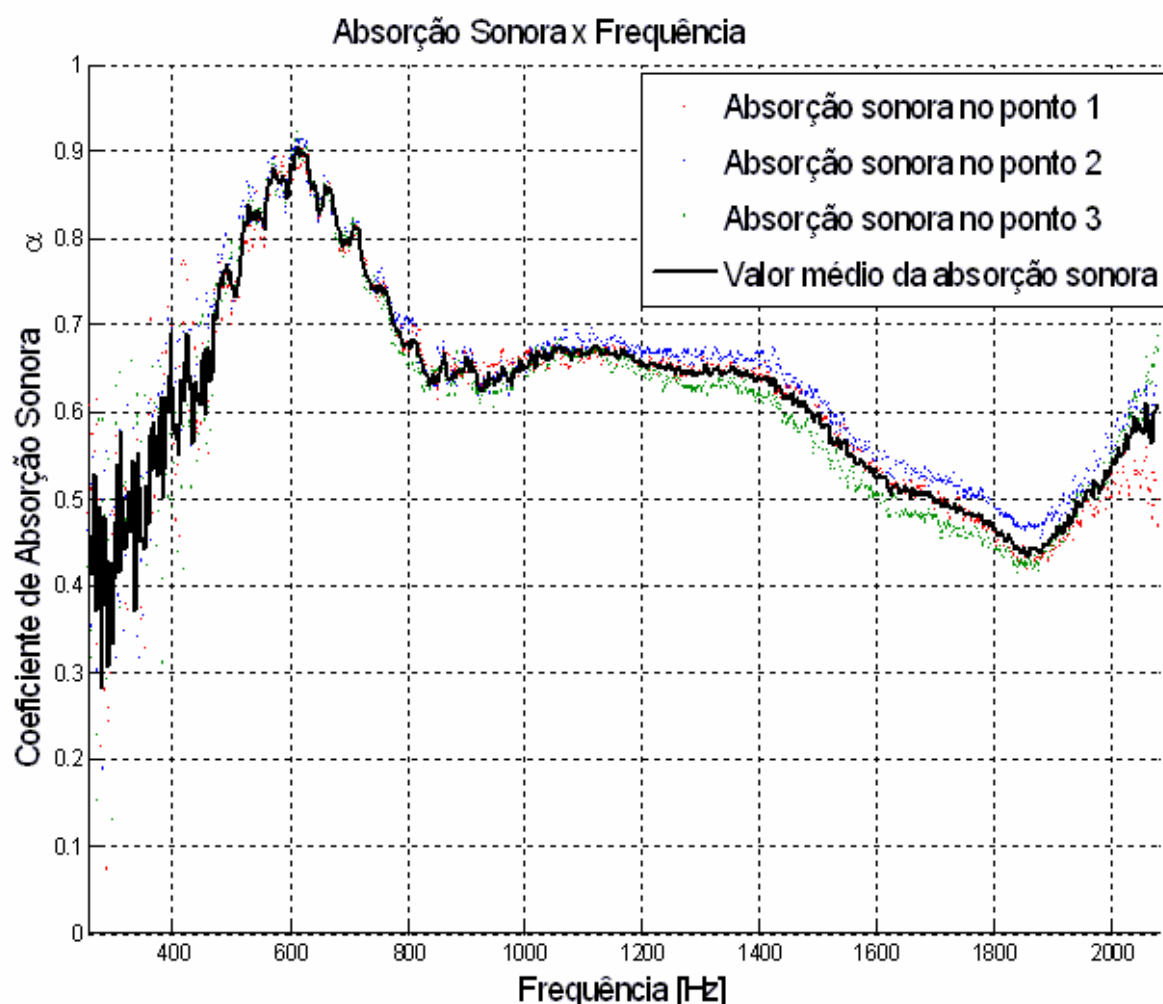


Figura 4.9 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 6.

Os valores médios do coeficiente de absorção sonora encontrados para o **corpo de prova 7**, apresentam dois valores de máximo, o primeiro a 623 Hz com valor de $\alpha = 0,88$ e o segundo a 1106 Hz com o valor de $\alpha = 0,67$, cabe frisar que este segundo pico de absorção para esta amostra, como já havia acontecido para o c.p.6, não foi tão pronunciado quanto para as outras amostras. Também ao longo da banda de frequências evidenciam-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro a 926 Hz com o valor de $\alpha = 0,61$ e o segundo mínimo a 1869 Hz com o valor de $\alpha = 0,41$. Na frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora é 0,65.

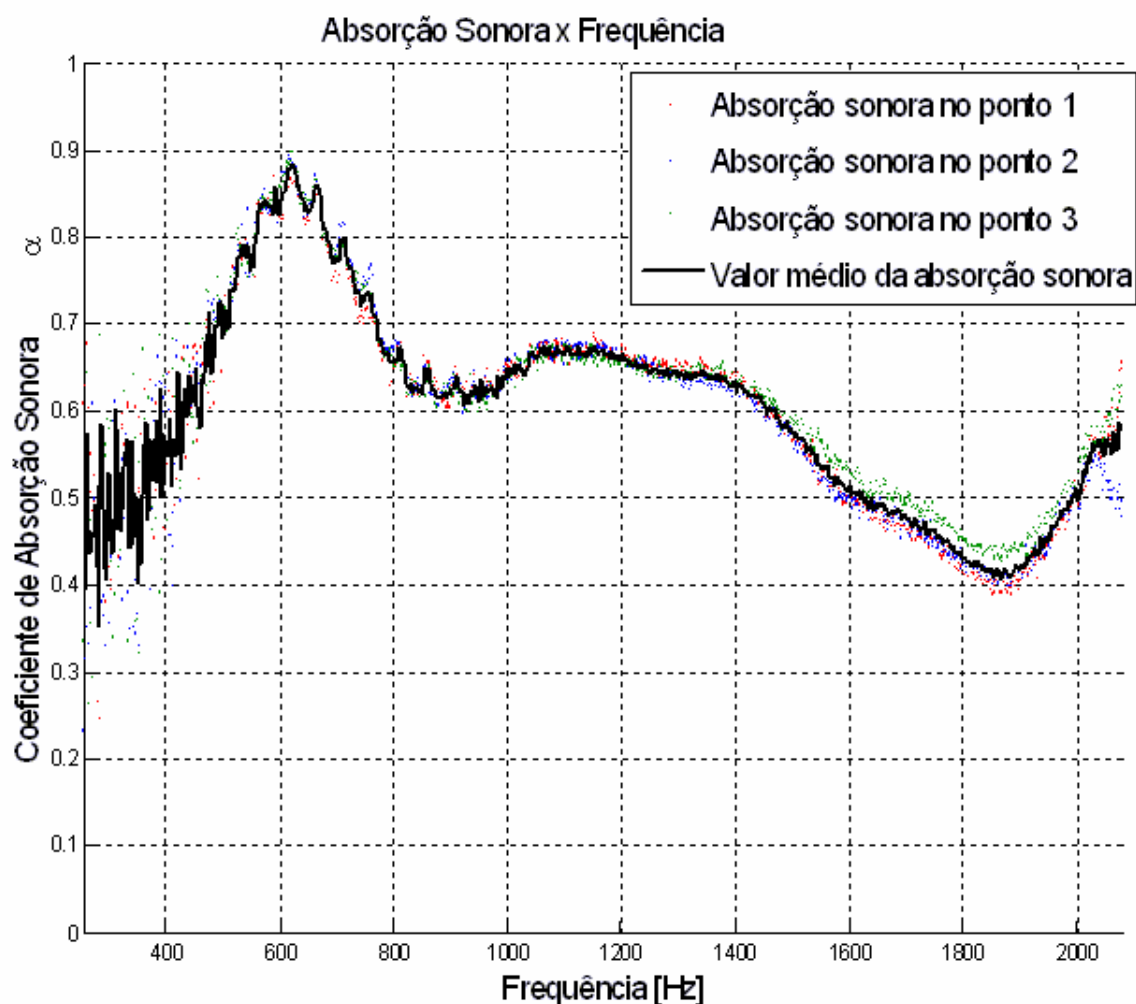


Figura 4.10 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 7.

Para o **corpo de prova 8**, a curva de absorção sonora em função da frequência apresentou um comportamento diferenciado com relação aos outros corpos de prova ensaiados. Os picos de absorção foram mais evidentes, e as posições destes máximos com relação à frequência foram diferentes dos apresentados para os corpos de prova anteriores. O primeiro máximo de absorção é encontrado a 462 Hz com valor de $\alpha = 0,76$, e o segundo máximo a 1662 Hz com o valor de $\alpha = 0,72$. Também ao longo da banda de frequências evidencia-se dois valores de absorção sonora mais baixos, o primeiro mínimo mais pronunciado, encontra-se a 969 Hz com o valor de $\alpha = 0,41$ e o segundo mínimo a 1953 Hz com o valor de $\alpha = 0,50$. Para a frequência de 1000 Hz o valor médio do coeficiente de absorção sonora foi de 0,42.

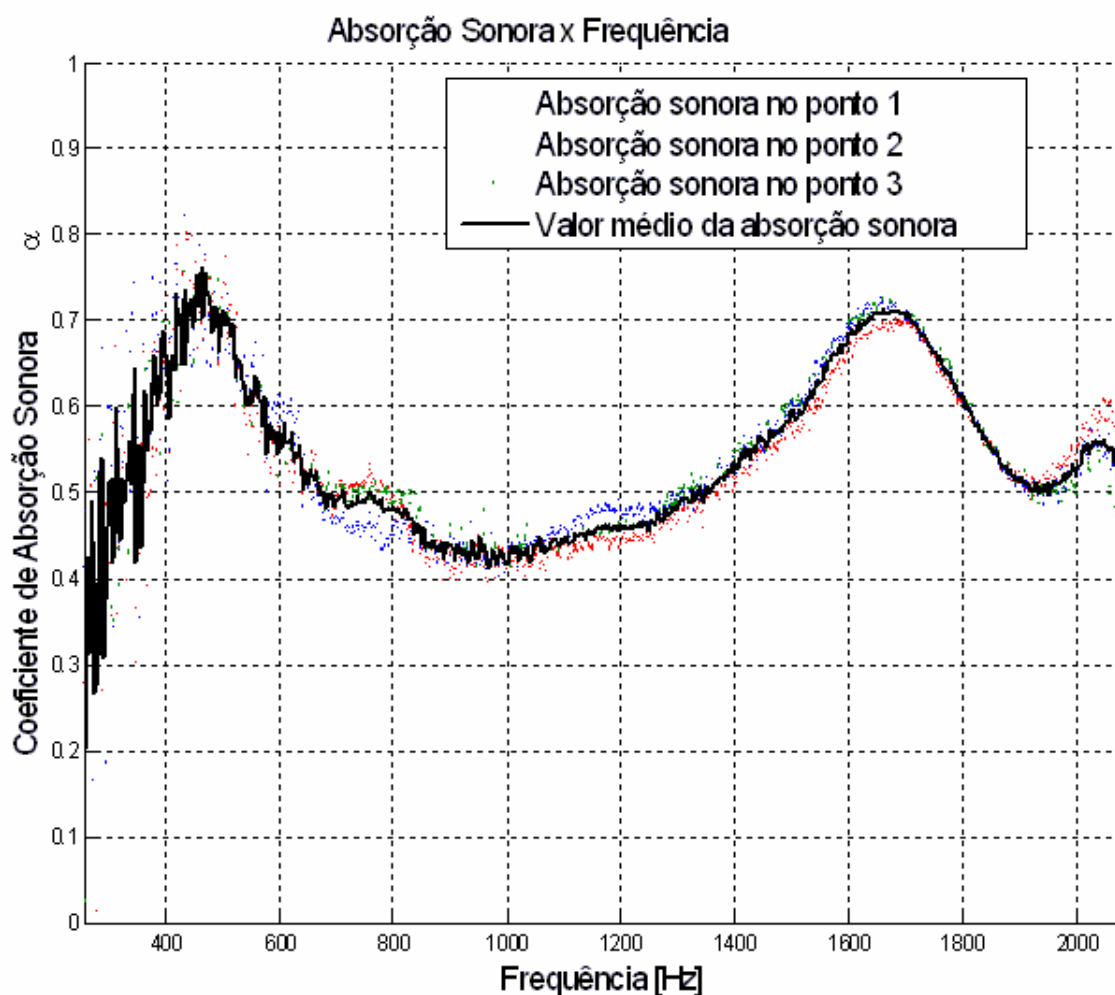


Figura 4.11 – Absorção sonora (α) x Frequência – Corpo de prova 8.

4.1.2 Função Coerência x Frequência

Apresenta-se graficamente, os resultados referentes à função Coerência (γ^2) em função da frequência, para cada posição do microfone e ponto sobre o c.p., esta função como já descrito anteriormente define a validade das medições realizadas.

Para a **corpo de prova 1**, observa-se (Figura 4.12) valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências, onde apenas em 1010Hz verifica-se um diminuição maior desta função, ficando a mesma em torno de 0,87.

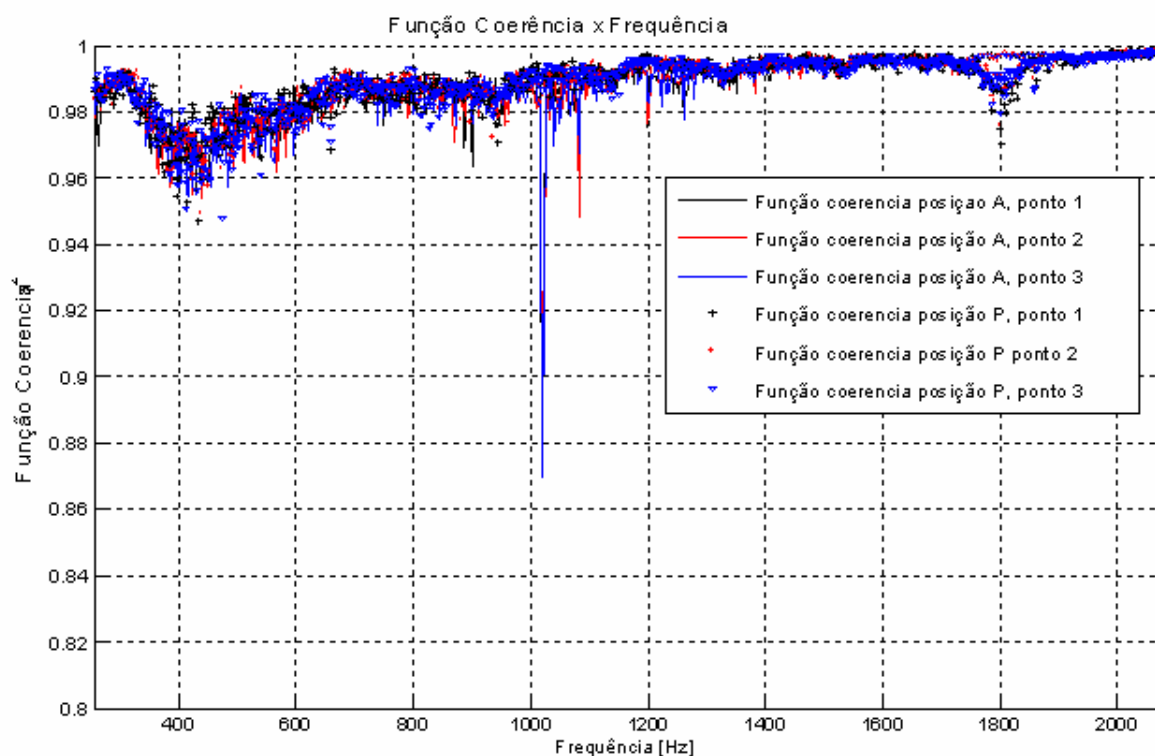


Figura 4.12 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 1.

A variação da função coerência observada para o **corpo de prova 2** (Figura 4.13), mostra valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências, onde a 500 e 1861 Hz verifica-se uma diminuição desta função tendo a mesma o valor de 0,96.

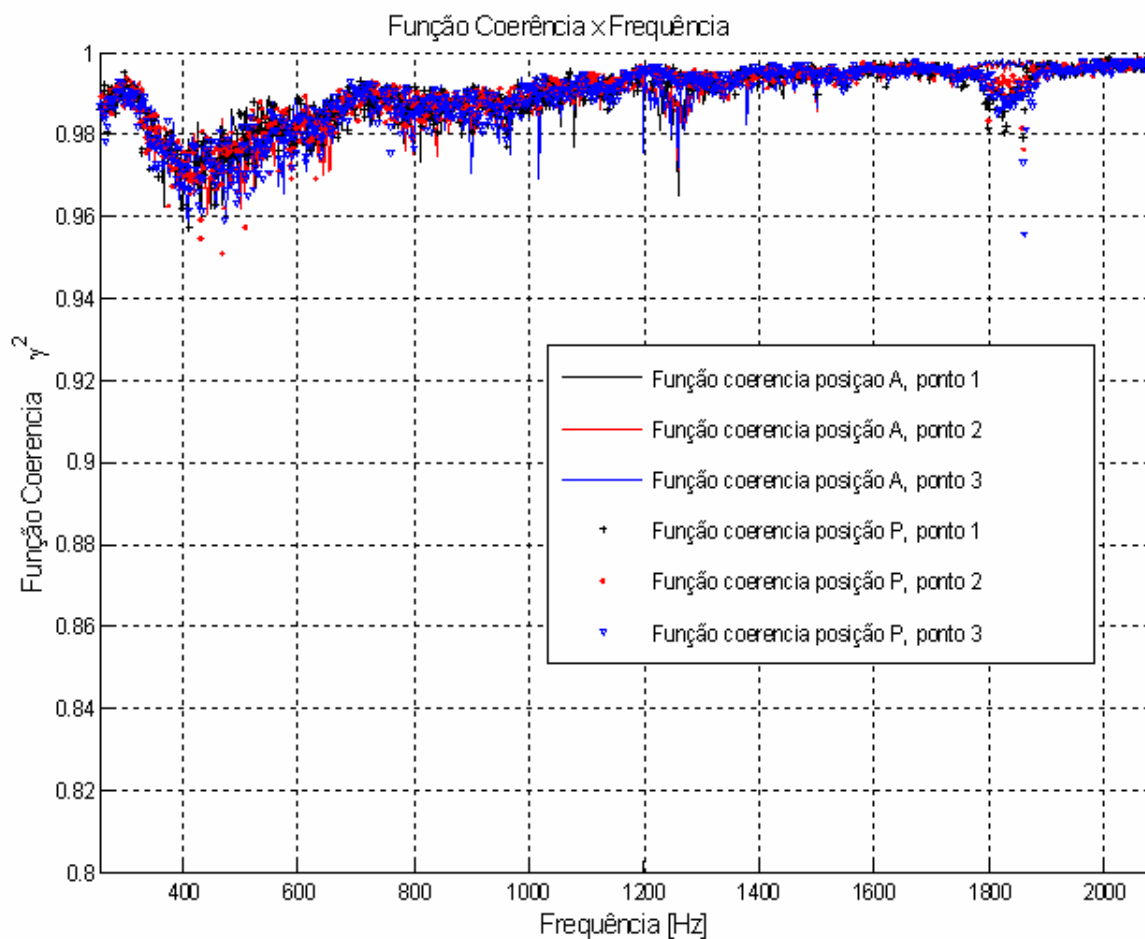


FIGURA 4.13 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 2.

Com relação à função coerência observa-se para o **corpo de prova 3** valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências, onde a 439 Hz verifica-se uma diminuição um pouco maior desta função ficando a mesma com valor em torno de 0,94.

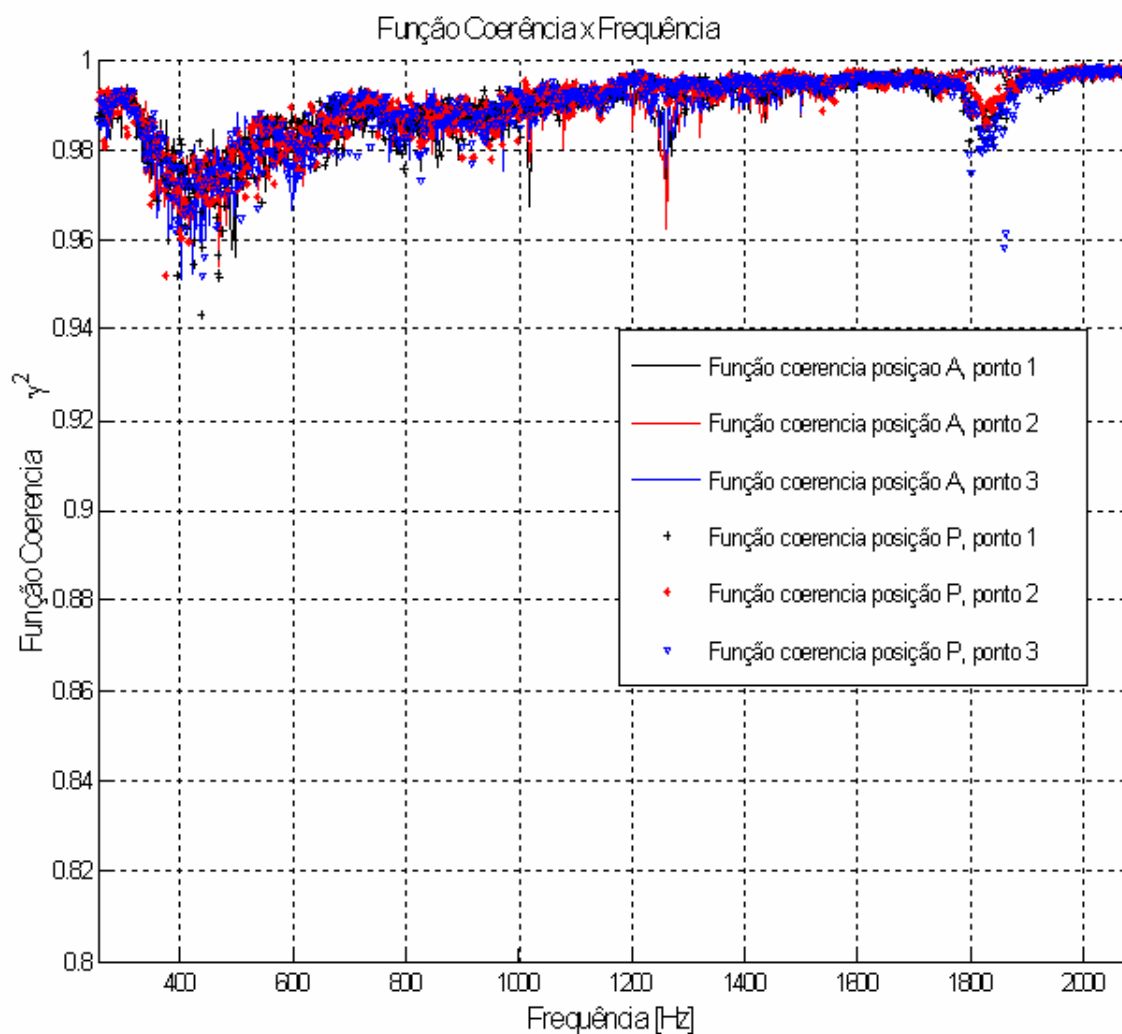


Figura 4.14– Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 3.

A função coerência observada para o **corpo de prova 4**, também apresenta valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências. Para a frequência de 410 Hz verifica-se uma diminuição mais acentuada desta função ficando a mesma próxima a 0,95.

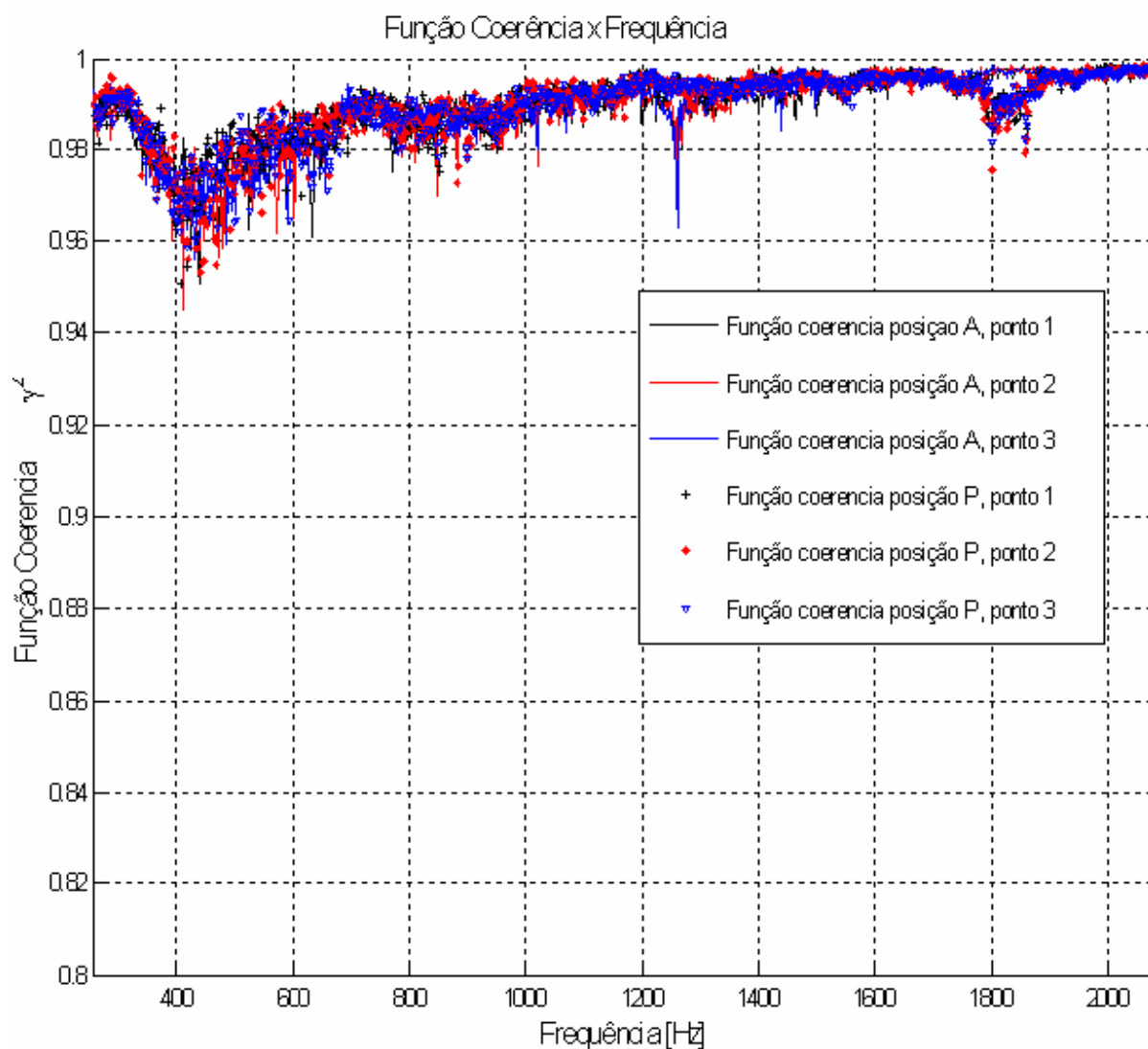


Figura 4.15 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 4.

A função coerência observada para o **corpo de prova 5**, apresenta valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências, onde a 390 Hz verifica-se uma diminuição um pouco maior desta função ficando a mesma com valor próximo de 0,94.

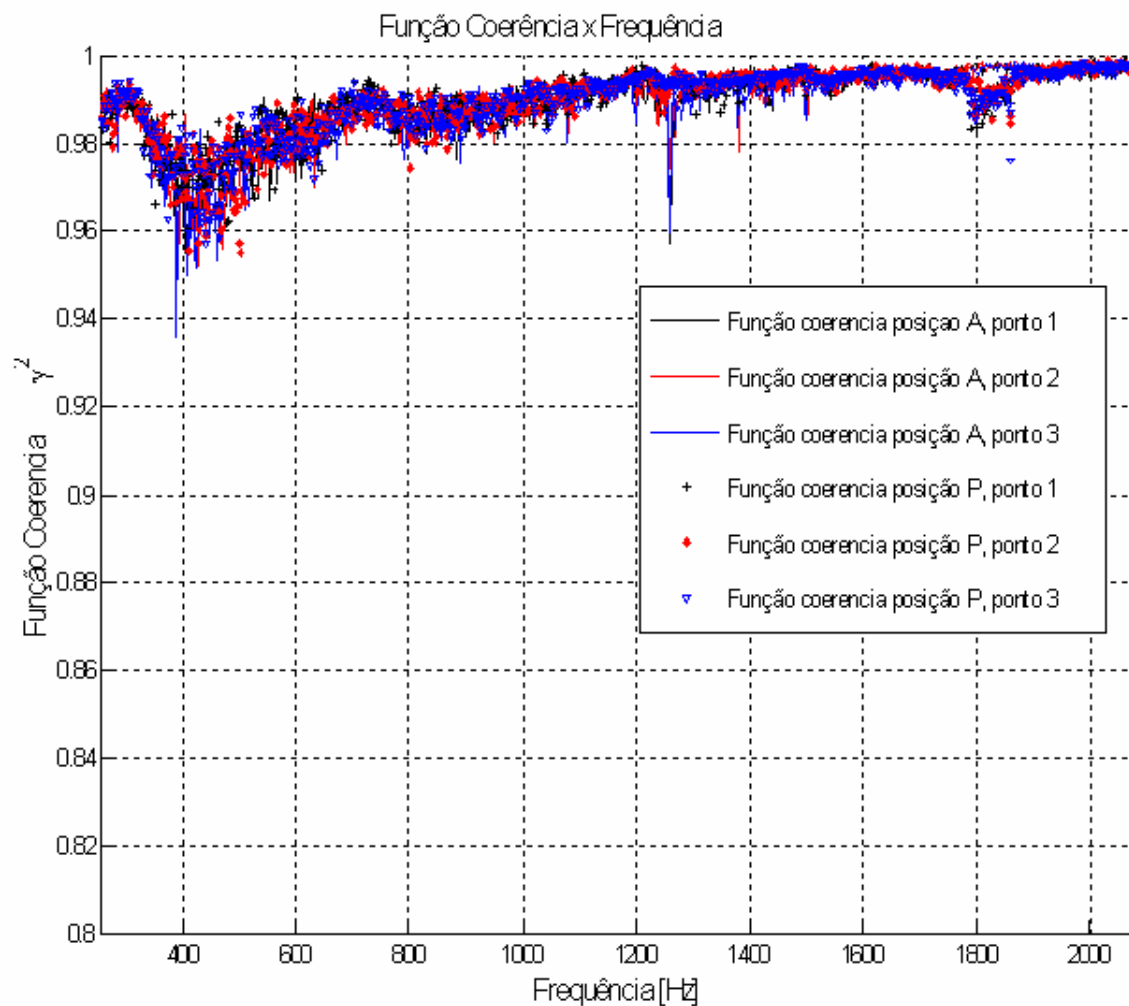


Figura 4.16 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 5.

A função coerência observada para o corpo de prova **6**, apresenta valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências. Nas frequências, 478 Hz e 1250 Hz verifica-se uma diminuição maior desta função ficando a mesma em torno de 0,94.

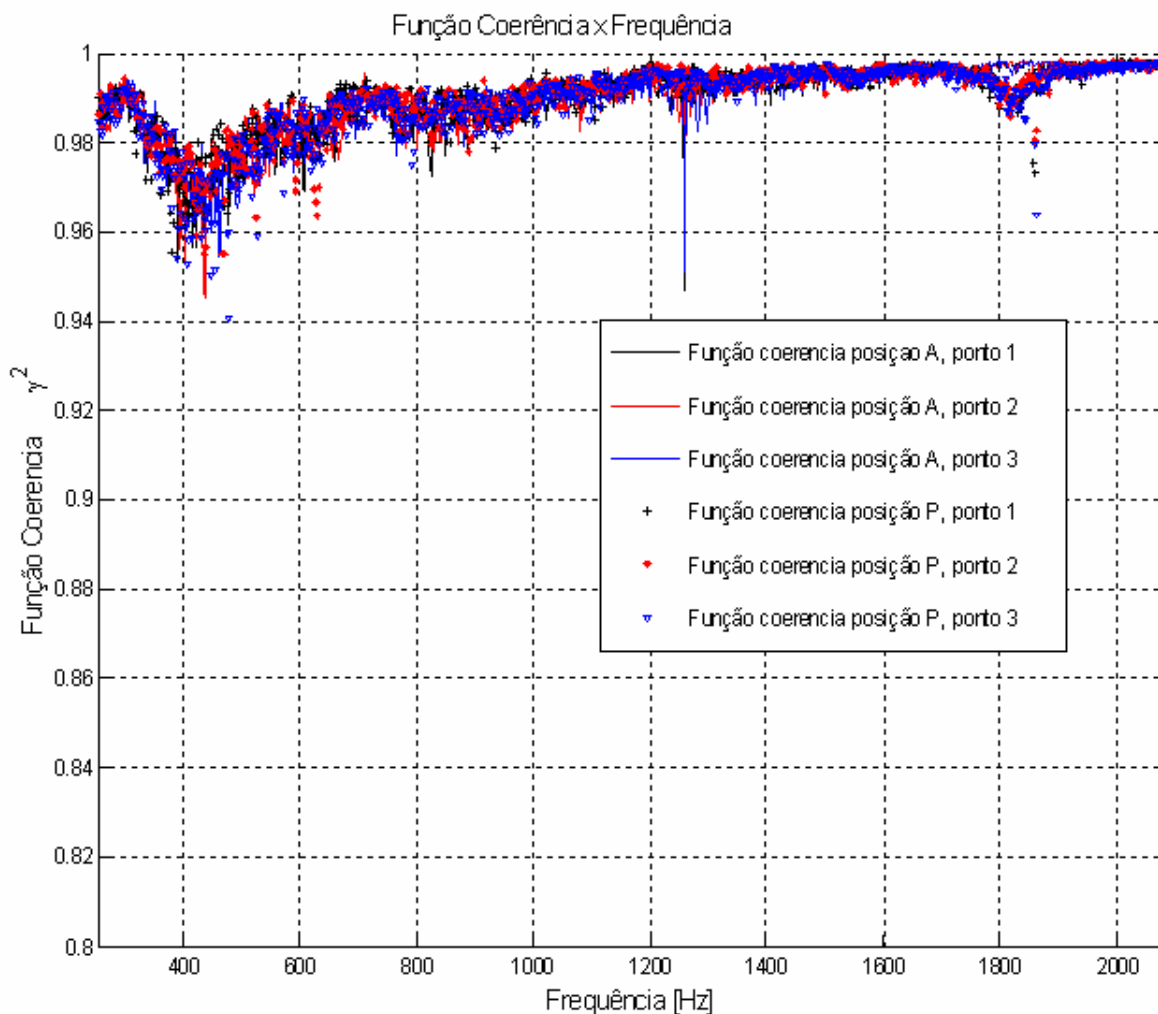


Figura 4.17 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 6.

A função coerência observada para o **corpo de prova 7**, também apresenta valores próximos da unidade para quase toda banda de frequências, onde apenas a 426 Hz verifica-se uma diminuição mais acentuada desta função ficando a mesma com o valor de 0,95.

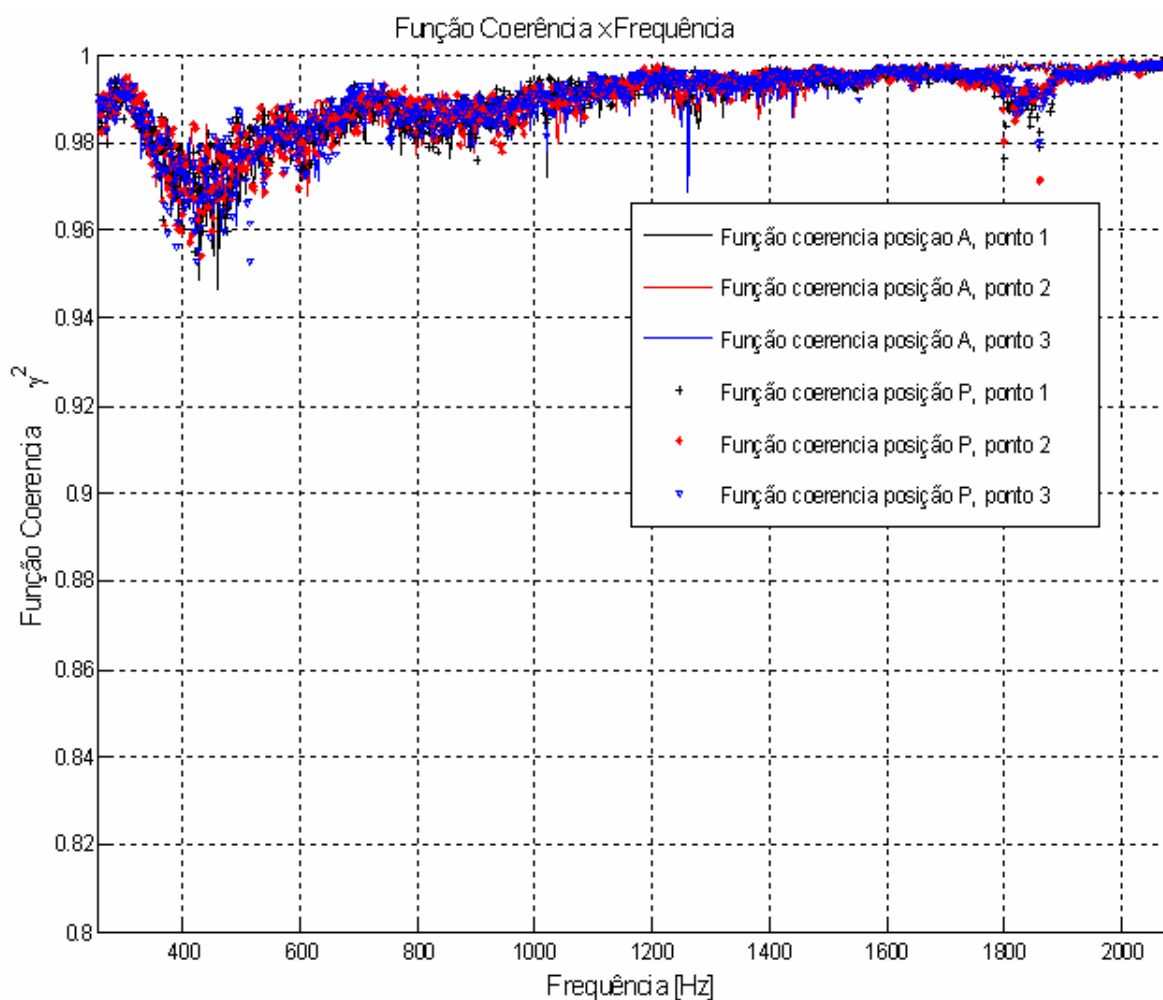


Figura 4.18 – Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 7.

A função coerência observada, para o **corpo de prova 8**, apresenta valores quase unitários para quase toda banda de frequências, onde apenas a 406 Hz e 1260 Hz, verifica-se um decréscimo desta função ficando a mesma em torno de 0,96.

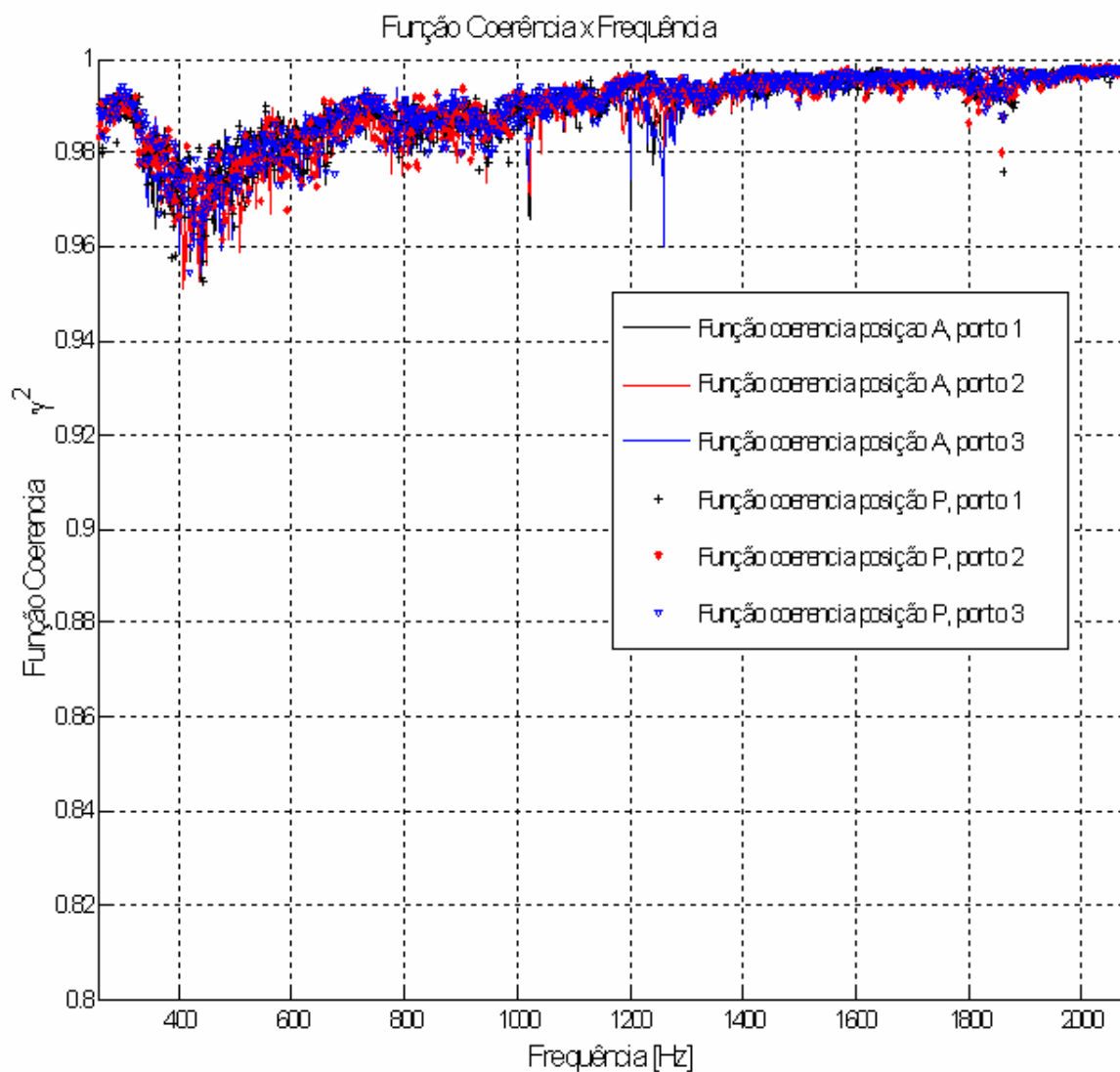


Figura 4.19– Função Coerência (γ^2) x Frequência – Corpo de prova 8.

4.1.3 Impedância Acústica x Frequência

Apresentam-se graficamente os valores da impedância normalizada (z) em função da frequência, nos três pontos de medição. A impedância é mostrada em termos do componente real e imaginário deste parâmetro.

Os valores da impedância acústica observados para o **corpo de prova 1**, tanto para a parte real quanto da parte imaginária (Figura 4.20), foram compatíveis com os resultados esperados para materiais menos absorventes acusticamente. Observa-se que a variação observada, em baixas frequências, para o valor do coeficiente de absorção sonora, repete-se para os valores da impedância.

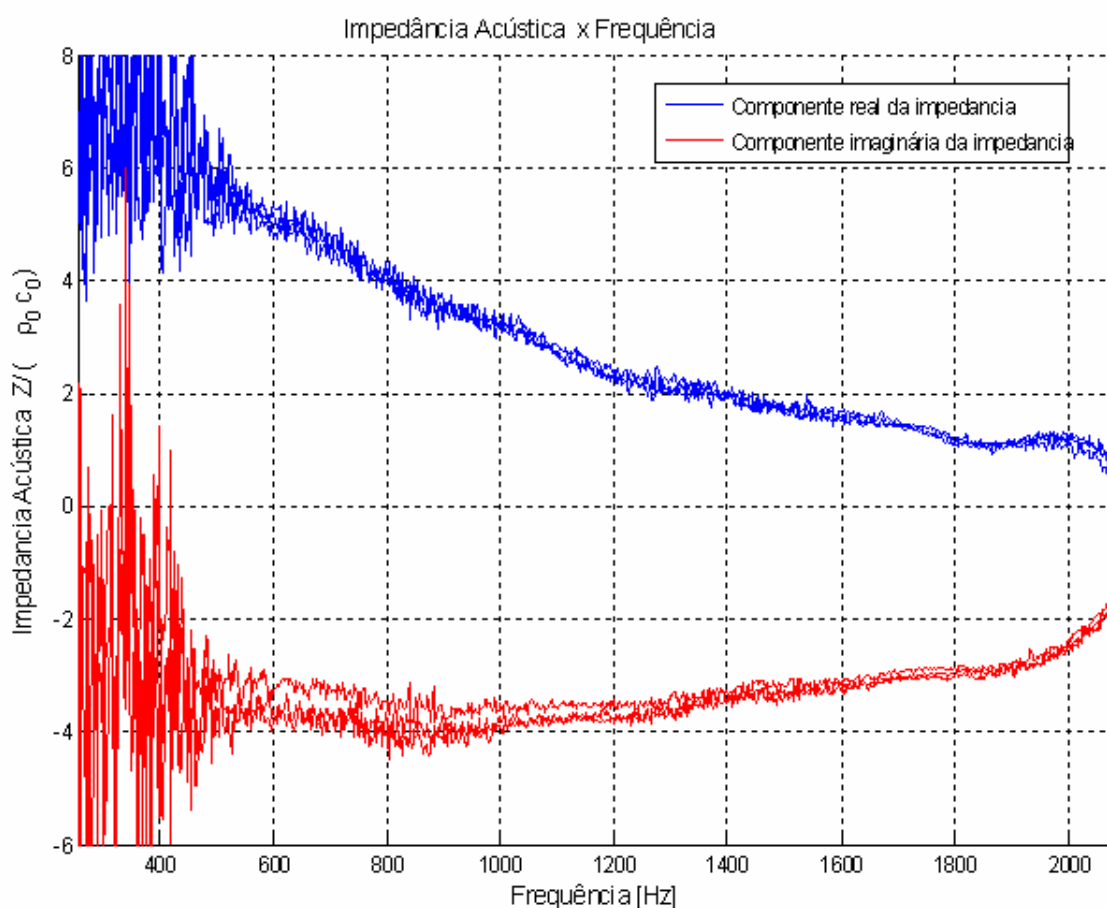


Figura 4.20 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 1.

Os valores da impedância normalizada apresentada pelo **corpo de prova 2** (Figura 4.21), são compatíveis com valores esperados para materiais absorventes acusticamente. O comportamento da curva de impedância com a frequência, tanto da componente real como da componente imaginária, mostram valores menores da impedância para frequências mais baixas (abaixo de 800 Hz), ou seja, nas regiões de maior absorção sonora, esta tendência foi observada para os demais c.p. com camada dupla e camada superficial drenante.

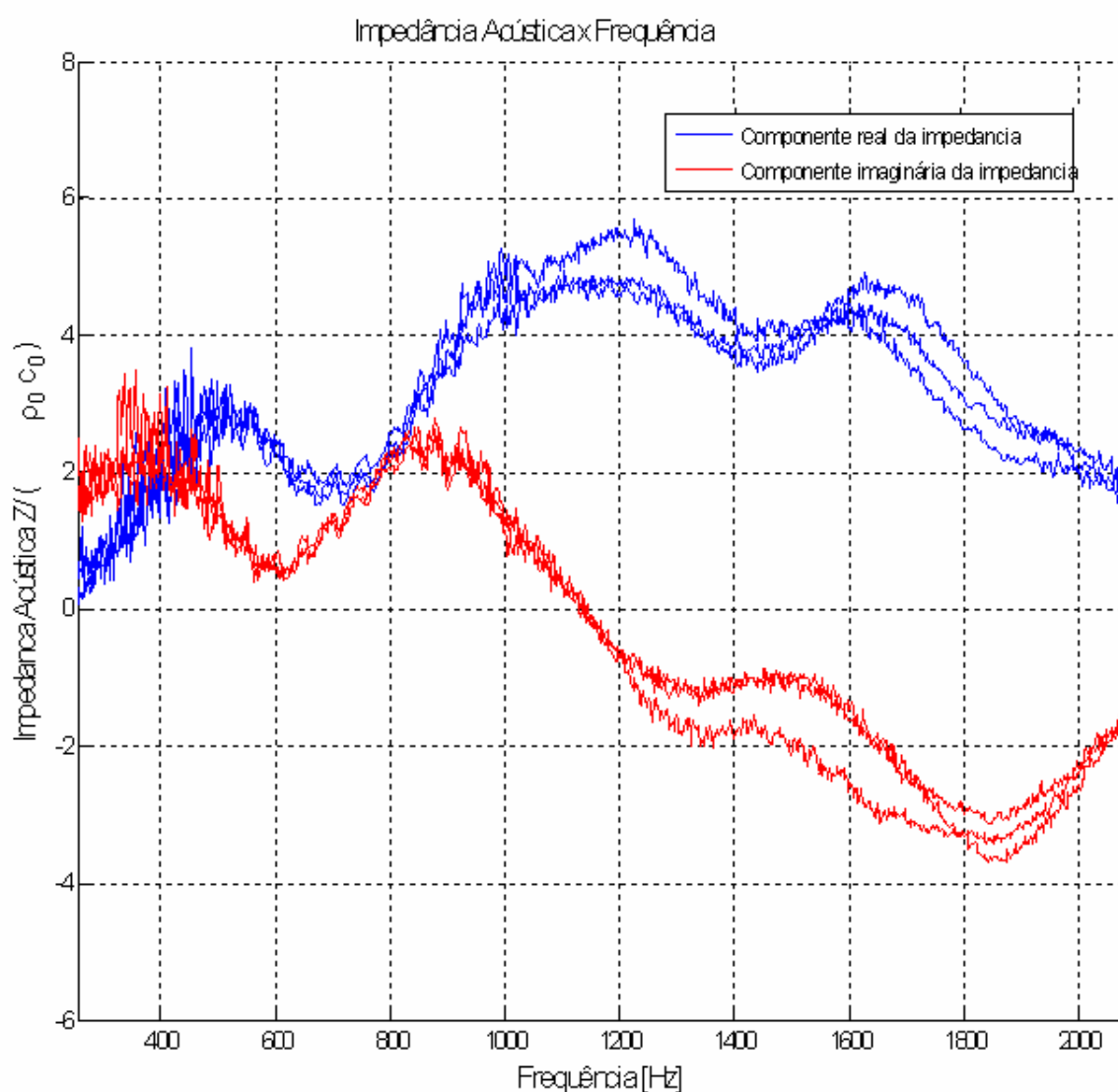


Figura 4.21– Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 2.

Os valores da impedância acústica obtida para o **corpo de prova 3**, apresenta baixos valores (módulo) para as regiões de pico de absorção, principalmente para frequências mais baixas (Figura 4.22).

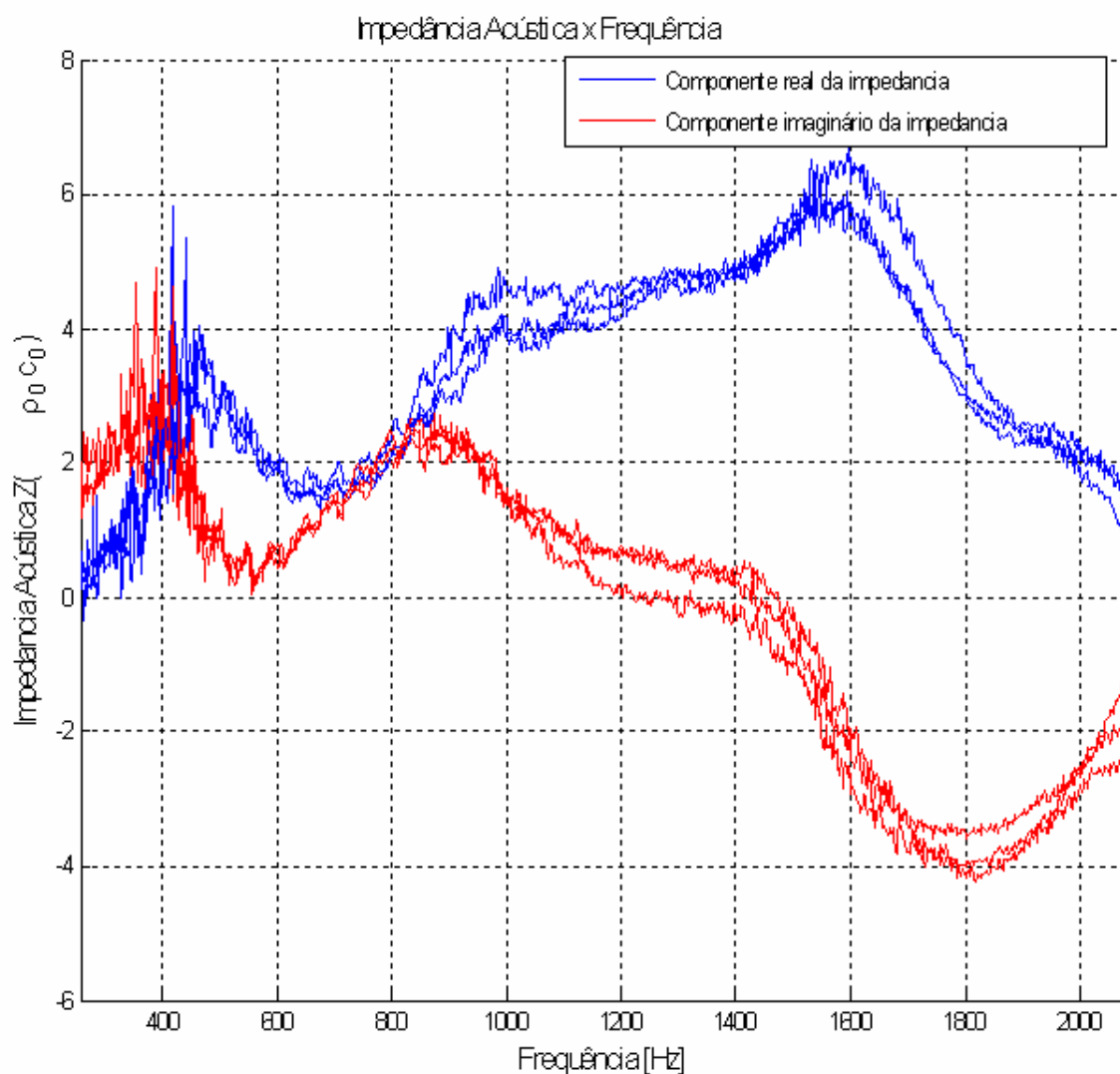


Figura 4.22 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 3.

Para o **corpo de prova 4** (Figura 4.23), os valores da impedância acústica foram mais baixos (módulo) para as regiões de pico de absorção sonora, principalmente para frequências mais baixas.

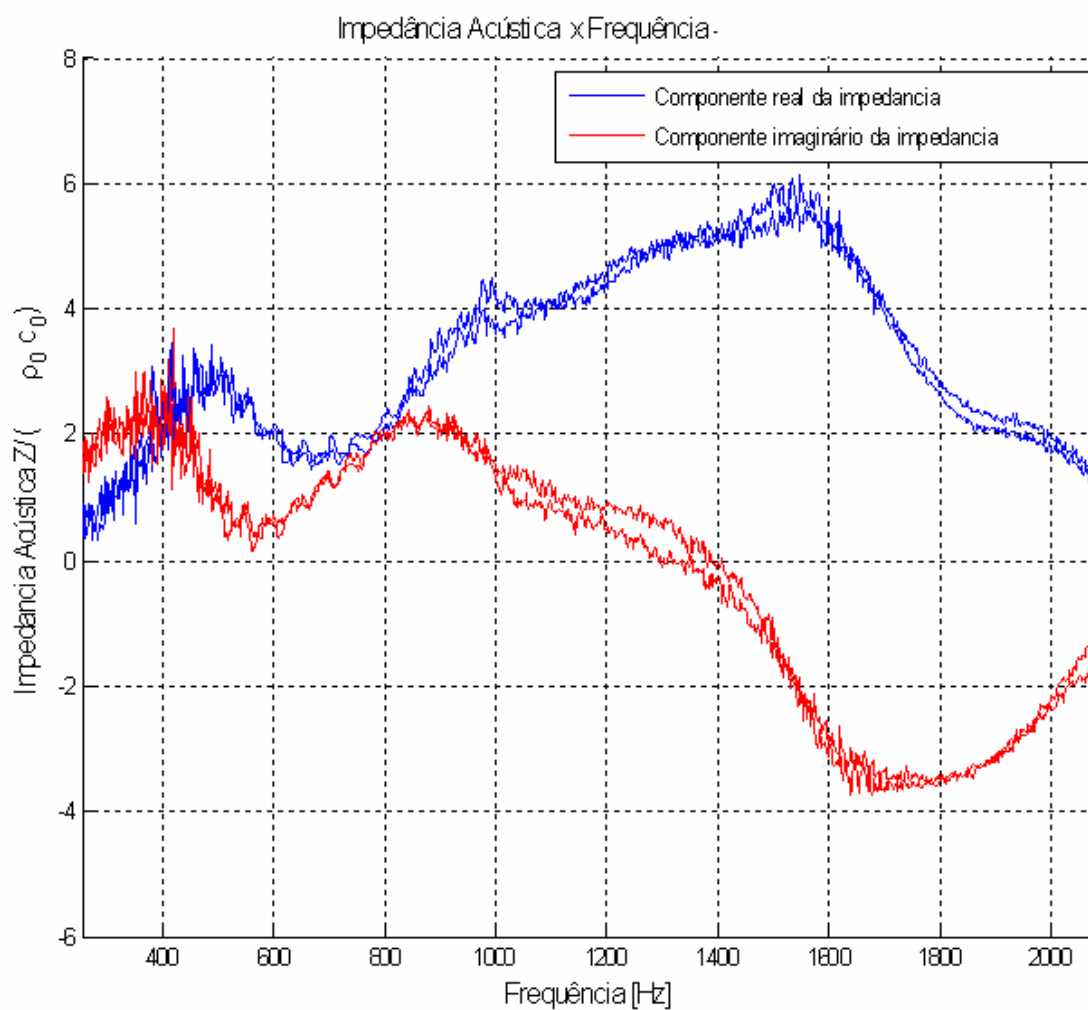


Figura 4.23 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 4.

Os valores de impedância obtidos para o **corpo de prova 5** (Figura 4.24), foram menores nos pontos de maior absorção sonora, sendo esta relação mais facilmente verificável para frequências abaixo de 700 Hz.

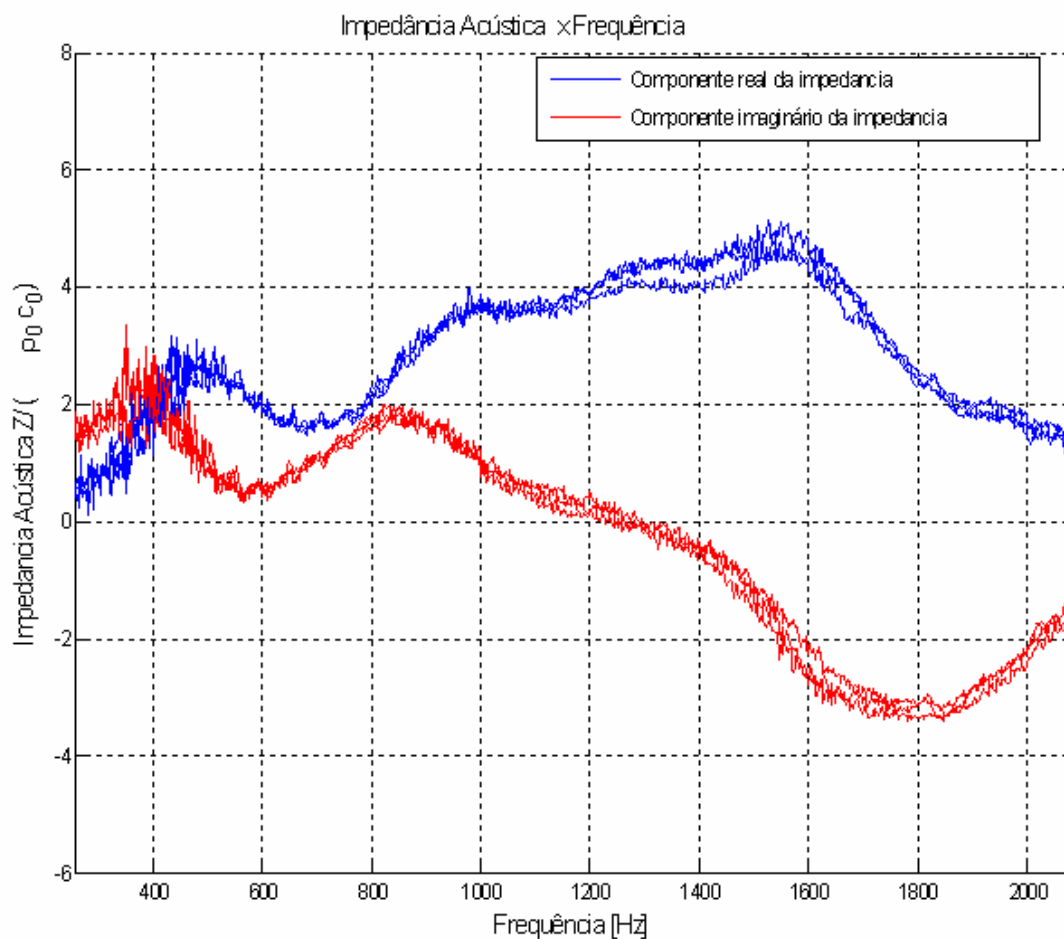


Figura 4.24 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 5.

As características da curva de impedância obtida para o **corpo de prova 6** (Figura 4.25), apresentam menores valores nos pontos de maior absorção sonora, esta relação evidencia-se para frequências abaixo de 700 Hz.

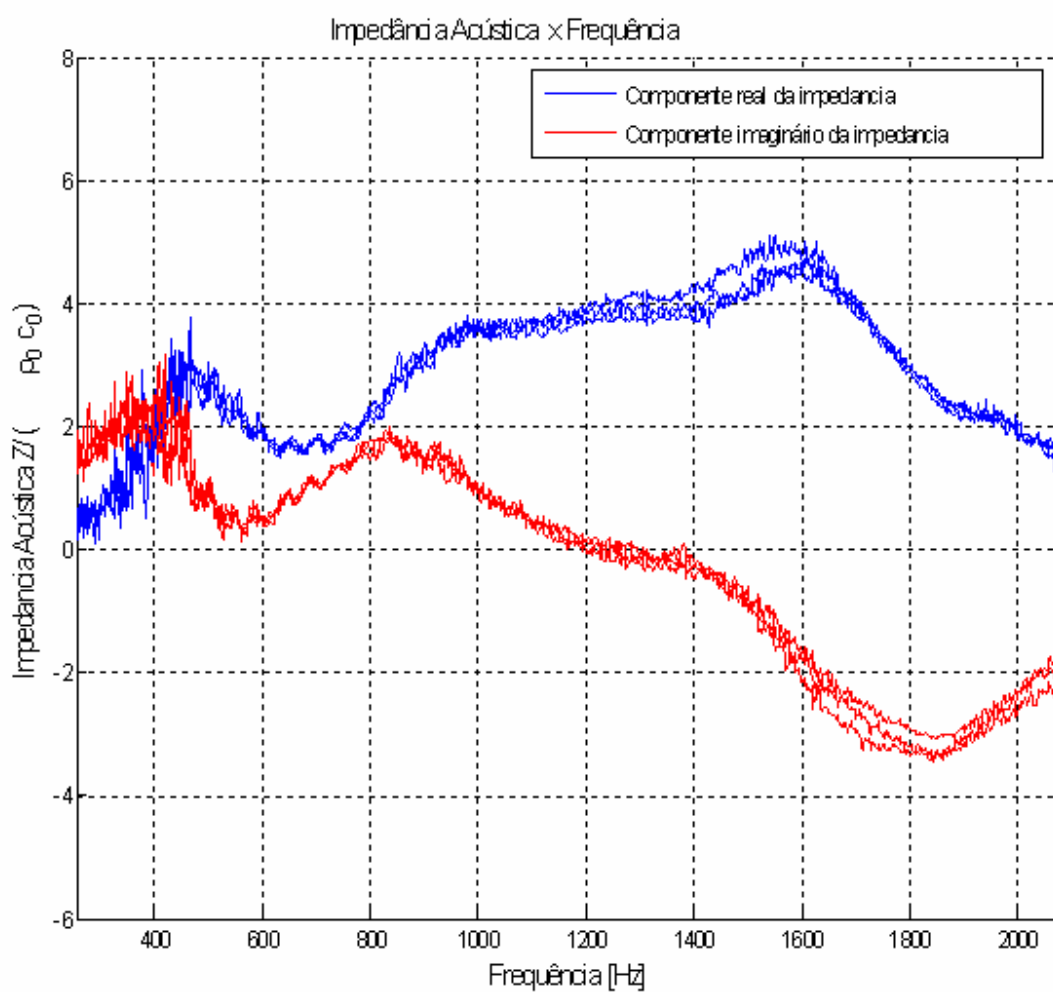


Figura 4.25 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 6.

Como nos c.p. anteriores os valores de impedância obtidos para o **corpo de prova 7** (Figura 4.26) apresentaram valores menores (módulo) nos pontos de maior absorção sonora, evidenciando-se esta relação principalmente para frequências abaixo de 700 Hz.

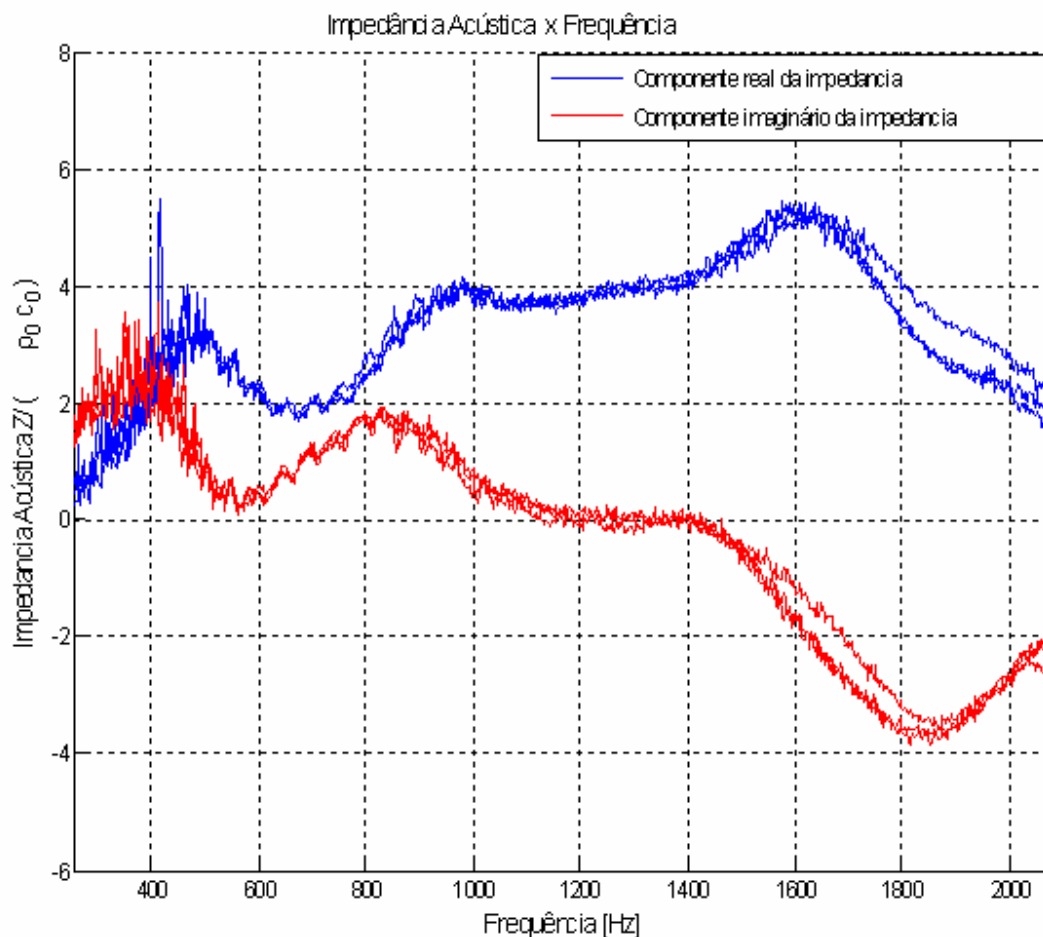


Figura 4.26– Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 7.

O corpo de prova 8 (Figura 4.27), apresenta características diferentes quanto a impedância, quando comparada os c.p. anteriores. Os máximos de impedância normalizada para este c.p. estão próximos da região da frequência de 1000 Hz, ou seja, na região que para este corpo de prova, apresenta menores valores do coeficiente de absorção sonora.

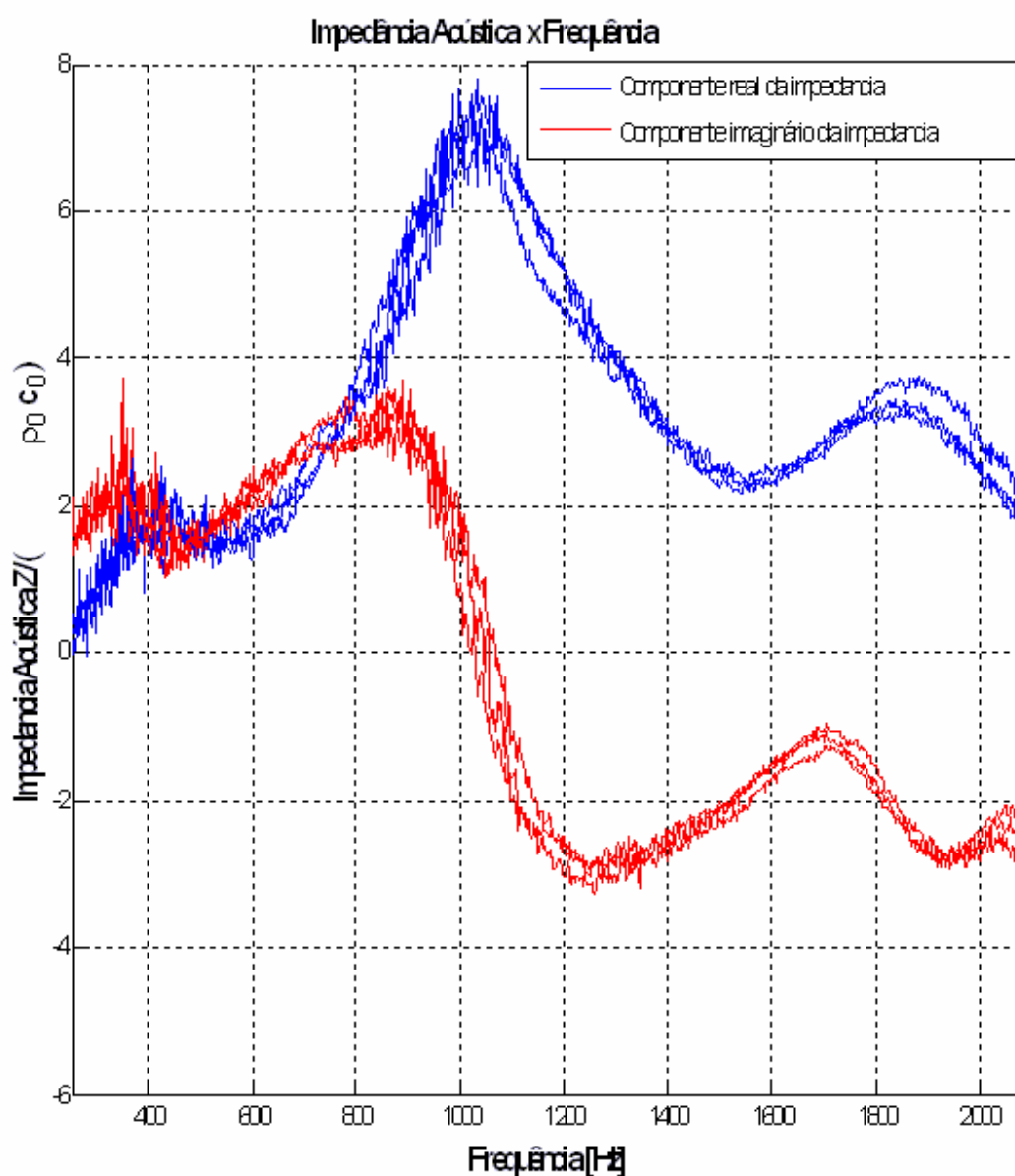


Figura 4.27 – Impedância Acústica (z) x Frequência – Corpo de prova 8.

4.1.4 – Resultados da calibração do equipamento de medição com chapa de aço

São apresentados na figura 4.28, os resultados gráficos da caracterização sonora da chapa de aço, utilizada nos ensaios de absorção sonora, para a verificação da calagem do equipamento utilizado. As curvas resultantes da caracterização acústica da chapa de aço mostram resultados próprios de materiais puramente reflexivos, ou seja, com absorção sonora próxima de zero.

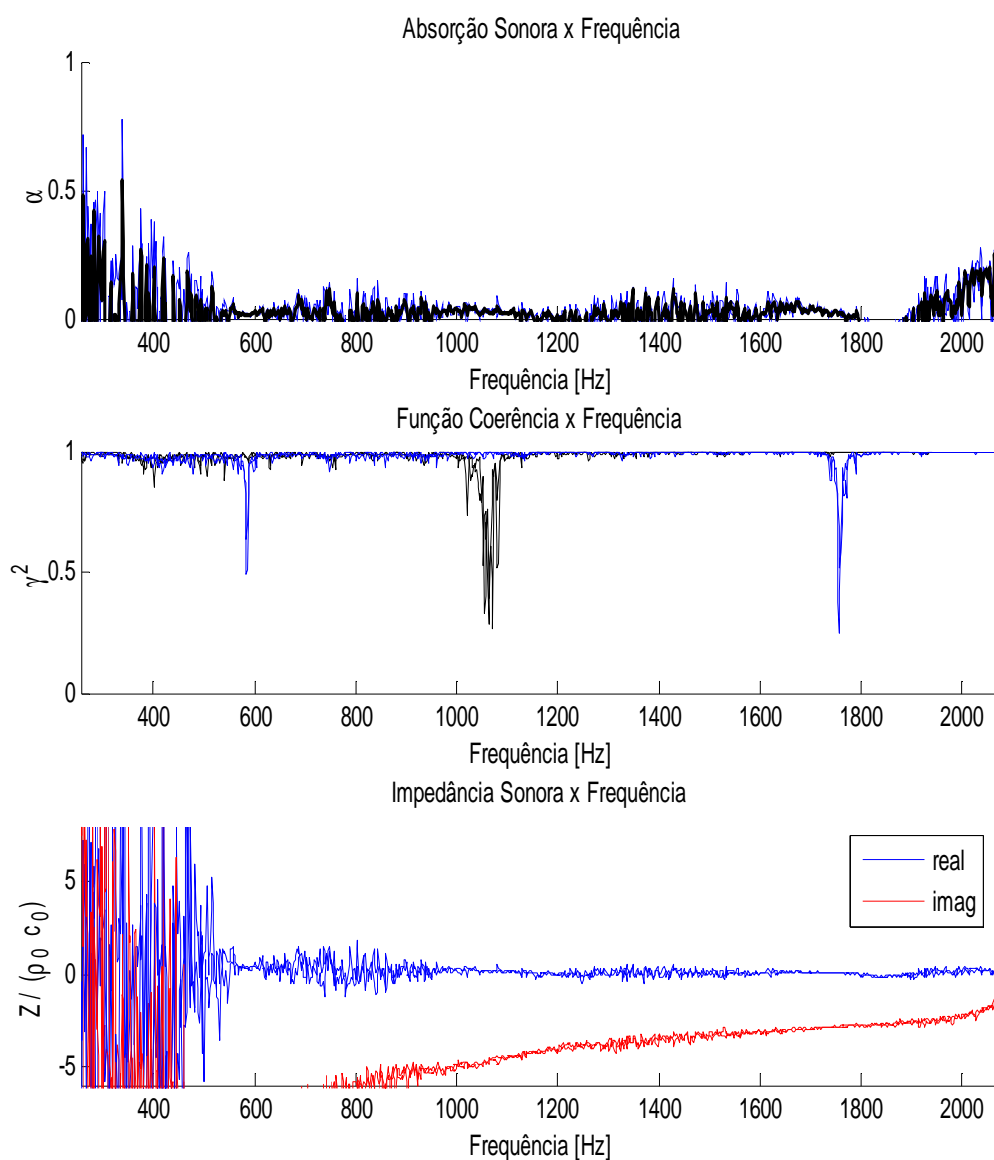


Figura 4.28 – Resultados da caracterização acústica de uma chapa de aço.

4.2 Ensaio Permeabilidade – Permeâmetro LCS NLT-327/88

O ensaio de permeabilidade foi executado em todos os c.p. com camada superficial drenante. Buscou-se na execução do ensaio, a verificação da permeabilidade nos mesmos pontos onde se verificou a absorção sonora dos c.p. com camada superficial drenante. Assim os pontos de medição ensaiados foram os mesmos, ou seja, pontos 1, 2 e 3. O volume de água escoada entre os meniscos é de 1734,94 cm³, e a área de escoamento do orifício de saída da água é de 7,07 cm². Na tabela 4.2 são apresentados os resultados do ensaio de permeabilidade.

Tabela 4.2. Resultados do ensaio de permeabilidade para os corpos de prova com camada superficial drenante.

Amostras	2	3	4	5	6	7	8
Tempo de escoamento no ponto 1 (s)	6,3	7,4	5,7	7,3	6,9	7,5	5,0
Tempo de escoamento no ponto 2 (s)	5,5	5,1	6,5	5,7	7,1	7,5	6,7
Tempo de escoamento no ponto 3 (s)	7,3	5,2	7,5	7,4	6,7	7,4	7,6
Tempo de escoamento Médio (s)	6,4	5,9	6,6	6,8	6,9	7,5	6,4
Velocidade de Escoamento Médio (cm/s)	38,5	41,7	37,3	36,2	35,5	32,8	38,3

Convém lembrar que o ensaio de permeabilidade com o permeâmetro LCS, é aplicável apenas para concretos asfálticos com camada superficial drenante, portanto este ensaio não foi executado para o c.p. 1.

CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Coeficiente de absorção sonora para corpos de prova com camada superficial drenante, mesmo ligante e diâmetros máximos diferentes

No capítulo quatro, foram apresentados os resultados dos ensaios de absorção sonora e de permeabilidade sobre os c.p. fabricados. Além disso, puderam-se observar as tendências de comportamento individuais dos c.p., tanto com relação à permeabilidade quanto com relação à absorção sonora. Agora, analisar-se-ão em conjunto os corpos de prova de concreto asfáltico com mesmo tipo de mistura (camada superficial drenante e mesmo tipo de ligante), mas com tamanhos máximos de agregado diferentes (9,5 e 12,5 mm).

Quando se compara, por exemplo, o c.p. 2, com o c.p.5, pode-se observar suas diferenças de comportamento quanto a absorção sonora. Nos dois corpos de prova no que se refere ao primeiro pico de absorção observam-se valores próximos seja na frequência deste primeiro pico e no valor médio do coeficiente de absorção sonora (c.p.2- frequência 653 Hz e $\alpha = 0,86$, c.p. 5 - frequência 619 Hz e $\alpha = 0,89$), com ligeiro aumento da absorção para o corpo de prova 5 (Figura 5.1).

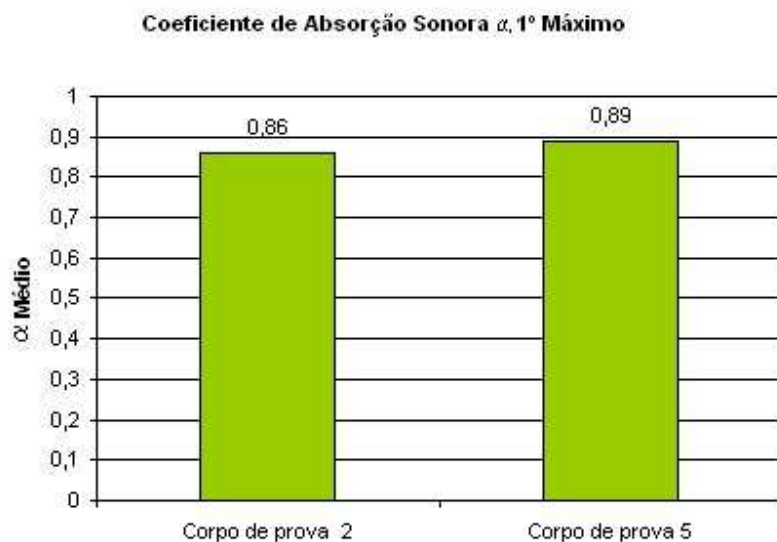


Figura 5.1 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2 e 5, primeiro máximo de absorção.

Observando os valores do segundo máximo de absorção verifica-se uma diferença maior nos valores médios da absorção sonora, ficando o c.p. 5 com o valor médio do coeficiente de absorção sonora maior (c.p. 2- frequência 1438 Hz e $\alpha=0,62$, c.p. 5 - frequência 1115Hz e $\alpha=0,67$). A figura 5.2 ilustra esta diferença.

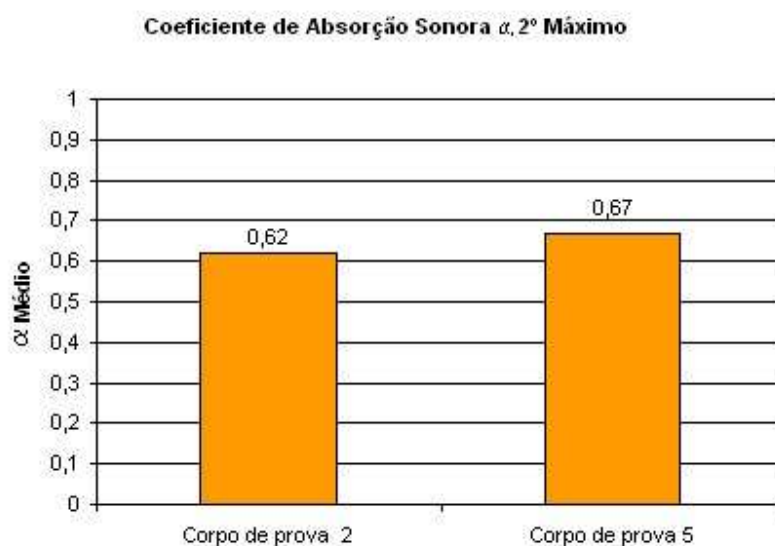


Figura 5.2– Comparação do coeficiente de absorção sonora para os c.p. 2 e 5, segundo máximo de absorção.

Ainda para estes corpos de prova, quando verificamos os mínimos de absorção, percebe-se maiores valores para o c.p. 5, em comparação ao c.p. 2. Para a faixa de frequência de ruído reportada na bibliografia como a de maior incômodo as populações próximas as vias (1000 Hz) verifica-se que o c.p. 5 possui maior valor para o coeficiente de absorção sonora (c.p. 2 com $\alpha = 0,56$, c.p. 5 com $\alpha = 0,64$), como mostra figura 5.3

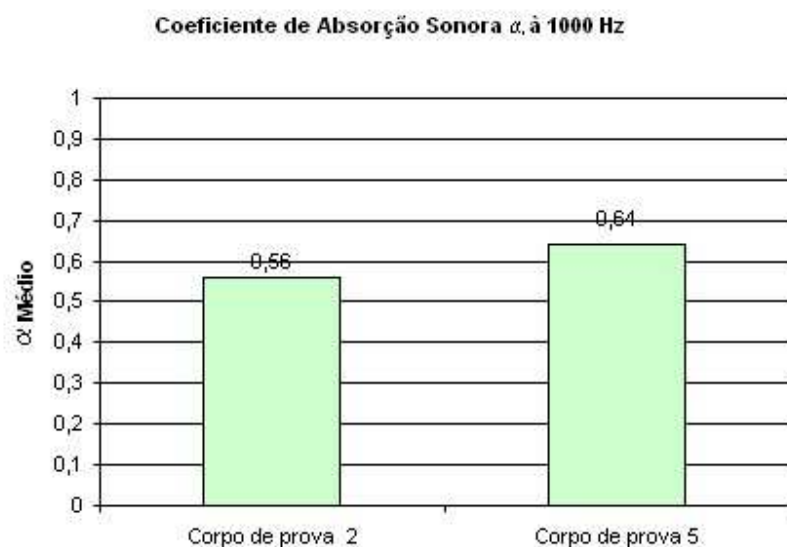


Figura 5.3 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os c.p. 2 e 5, na faixa de frequência de 1000 Hz.

Pode-se também fazer comparações, quanto ao comportamento acústico, dos corpos de prova 3 e 6 e corpos de prova 4 e 7. Os valores encontrados para o primeiro máximo de absorção para os corpos de prova 3 e 6, foram ligeiramente diferentes (c.p. 3 à frequência de 619 Hz e $\alpha=0,89$, c.p. 6 à frequência de 613 Hz e $\alpha=0,90$), como mostra a figura 5.4.

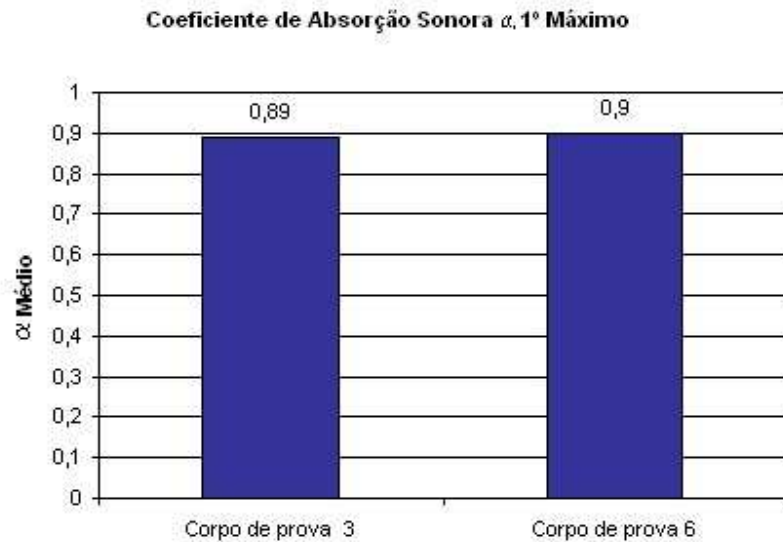


Figura 5.4 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os c.p. 3 e 6, primeiro máximo de absorção.

A diferença maior encontrada para estas amostras, foi com relação, ao segundo pico de absorção (c.p. 3- frequência 1111 Hz e $\alpha=0,61$, c.p. 6- frequência 1061 Hz e $\alpha=0,68$), onde o corpo de prova 6 apresentou maior valor médio do coeficiente de absorção sonora (Figura 5.5).

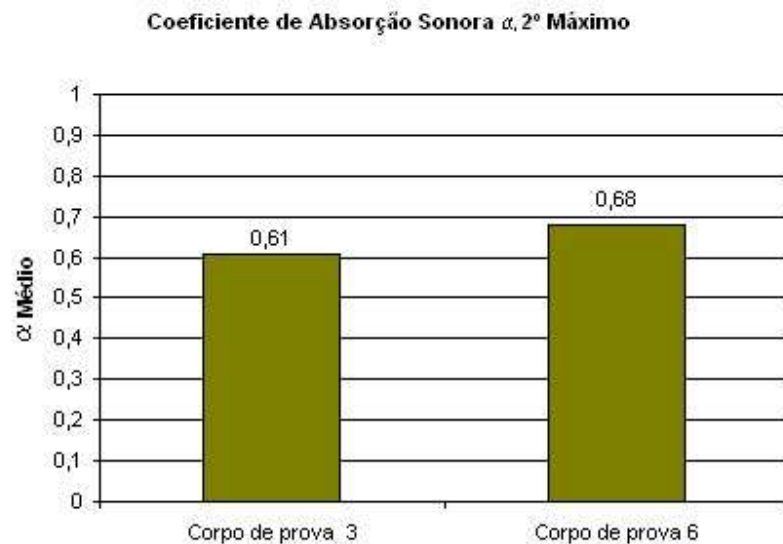


Figura 5.5 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 3 e 6, segundo máximo de absorção.

Na verificação dos valores mínimos de absorção, observa-se que o c.p. 6 apresentou maiores valores em comparação ao c.p. 3, tanto para o primeiro mínimo quanto para o segundo (primeiro mínimo c.p. 3 - frequência 932 Hz e $\alpha=0,53$, c.p.6 - frequência 927 Hz e $\alpha=0,62$, segundo mínimo c.p. 3- frequência 1859 Hz e $\alpha=0,38$, c.p. 6- frequência 1061 Hz e $\alpha=0,43$). Comparando os valores do coeficiente de absorção sonora para a faixa de frequência de 1000 Hz, observa-se que o corpo de prova 6 apresentou o maior valor (Figura 5.6).

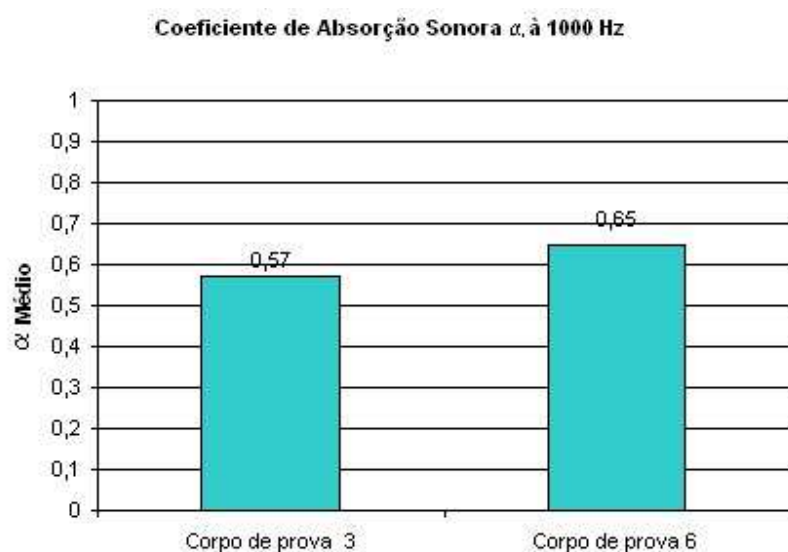


Figura 5.6 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para as amostras 3 e 6, na faixa de frequência de 1000 Hz.

Analisando os resultados do ensaio de absorção para os corpos de prova 4 e 7, verifica-se que o comportamento acústico dos mesmos foi muito próximo com relação aos valores do coeficiente de absorção sonora, seja para valores máximos (Figuras 5.7 e 5.8) como para valores de mínimo .



Figura 5.7 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, primeiro máximo de absorção.

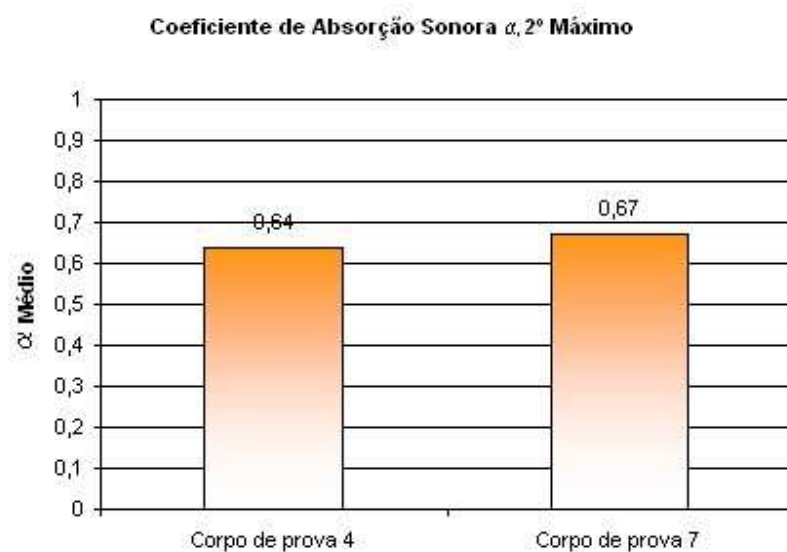


Figura 5.8 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, segundo máximo de absorção.

Para a faixa de frequência de 1000 Hz o corpo de prova 7 apresentou valor médio do coeficiente de absorção maior quando comparada com o corpo de prova 4 (Figura 5.9).

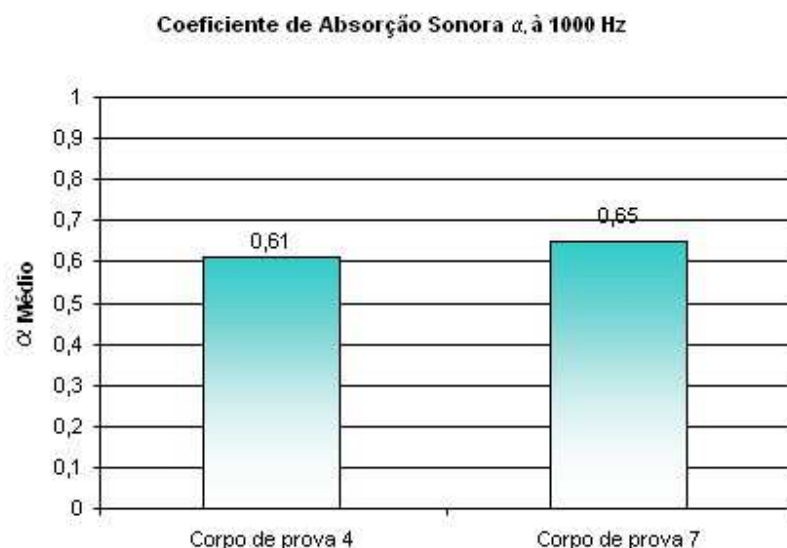


Figura 5.9 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 4 e 7, na faixa de frequência de 1000 Hz.

5.2 Magnitude, posição dos picos de absorção e variação do coeficiente de absorção sonora com o ligante utilizado na mistura drenante

As variações experimentadas na fabricação das misturas drenantes foram com relação ao tipo de ligante que compunha a mistura (CAP 50-70, CAP 65-60 com 4 % SBS, CAP 50-70 com AMB 15%), e variação das granulometrias das camadas superficiais drenantes (diâmetros máximos de 9,5 e 12,5 mm). De acordo com os resultados apresentados, as diferenças quanto às magnitudes do coeficiente de absorção sonora foram mais perceptíveis para o segundo pico de absorção e também para a faixa de frequência de 1000 Hz.

O coeficiente de absorção sonora mais baixo para tamanhos de agregado maiores possui como explicação o fato de que apesar de misturas com tamanhos de agregados maiores produzirem poros maiores e conseqüentemente capacitar o som a entrar mais facilmente dentro da superfície

do corpo de prova, um sistema com poros maiores possui tortuosidade mais baixa. A absorção acústica é uma função da porosidade total assim como da tortuosidade do sistema, o que aumenta as perdas por atrito. Portanto, para o estudo realizado, a variação da granulometria da superfície drenante de 9,5 para 12,5mm faz com que as amostras tenham uma porosidade mais alta, mas perdas por atrito baixas, assim corpos de prova com granulometrias maiores da camada superficial drenante tendem a possuir uma absorção sonora menor.

Outros parâmetros verificados foram a magnitude e a posição dos picos de absorção. A magnitude do pico absorção é dependente das características da mistura, já a frequência em que os picos de absorção ocorrem é dependente da espessura dos corpos de prova. Observando os resultados dos ensaios de absorção executados, verifica-se que as variações encontradas quanto à posição dos máximos de absorção foram pequenas para quase todos os corpos de prova. A mudança maior de posição dos picos de absorção foi verificada para o corpo de prova com camada tripla. Isto se deve ao fato, de que como os c.p. ensaiados (que possuem camada superficial drenante e camada dupla) à absorção sonora possuem, aproximadamente a mesma espessura as posições dos picos de máximo tendem a ser os mesmos. Para cada uma das curvas apresentadas, a frequência do pico de absorção pode ser pensado como uma função da velocidade do som em um meio em particular e da espessura do corpo de prova. Como a velocidade da onda acústica no ar é aproximadamente constante, a espessura do corpo de prova deve ser mudada, para deslocar as frequências de ocorrência dos picos de absorção (como ocorreu para o corpo de prova 8). Os picos de absorção ocorrem em frequências que podem ser calculadas de acordo com a relação (Olek, 2004 apud Zwicker e Kosten):

$$f_{PICO} = \frac{n \cdot c}{4 \cdot l}, \quad (4.0)$$

Onde:

f_{PICO} - é a frequência do pico de absorção;

n - é um número ímpar inteiro correspondendo ao pico (1 para o primeiro pico, 3 para o segundo pico e assim por diante);

c - é a velocidade onda sonora no meio (343 m/s para o ar a 20 °C) e

l - é a espessura do corpo de prova.

Como c e n são constantes, o produto de frequência pela espessura do corpo de prova também devem ser uma constante. Plotando-se o produto da frequência pela espessura do corpo de prova, contra o coeficiente de absorção, os picos de absorção devem aparecer na mesma frequência. Isto é vantajoso, por exemplo, na seleção de uma espessura mais eficiente acusticamente para pavimentos drenantes, baseado na frequência dominante do ruído a ser atenuado.

Com relação às magnitudes do coeficiente de absorção sonora, não ficou clara a relação deste parâmetro com a variação do tipo de ligante utilizado nas misturas asfálticas (dentro do grupo de corpos de prova com camada superficial drenante com diâmetros máximo iguais de seus granulares), pois os valores encontrados foram muito próximos (Figura 5.10).

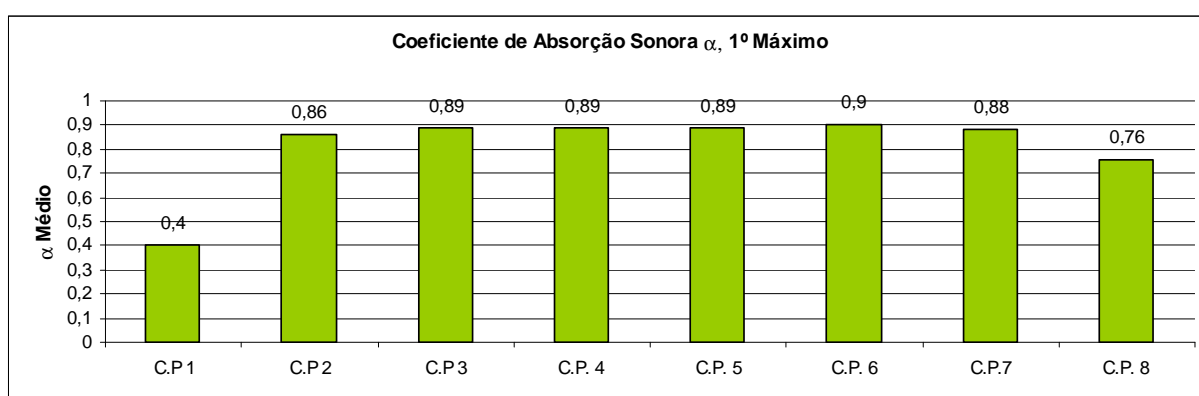


Figura 5.10 – Comparação do coeficiente de absorção sonora máximo, todos corpos de prova.

5.3 Coeficiente de absorção sonora para o corpo de prova com camada tripla

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que o corpo de prova 8 possui comportamento a absorção sonora diferenciado, com relação ao comportamento apresentado pelos demais corpos de prova com camada superficial drenante. A curva de absorção sonora para este c.p., teve a posição dos seus picos de absorção sonora deslocados e apresentou uma tendência de menores valores para α , nas frequências mais centrais. Puderam-se comparar os valores de máximo de absorção sonora, deste corpo de prova, com os valores apresentados pelos corpos de prova com mesmo tamanho máximo dos agregados na camada superficial drenante. Constata-se nesta

comparação que o c.p. 8 possui menores valores de α , para as frequências mais baixas (1º máximo), para a faixa de frequência de 1000Hz, mas possui maior valor de α , para o segundo máximo de absorção (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13).

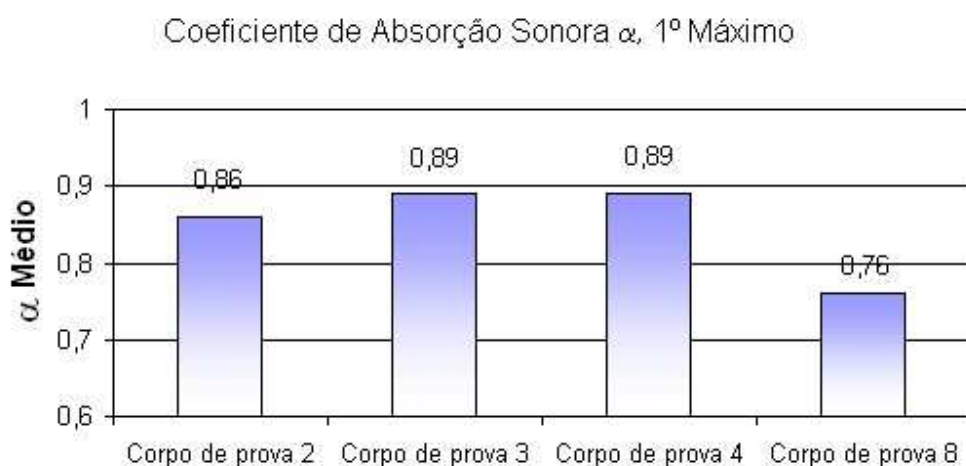


Figura 5.11 –Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2,3,4 e 8, primeiro máximo de absorção.

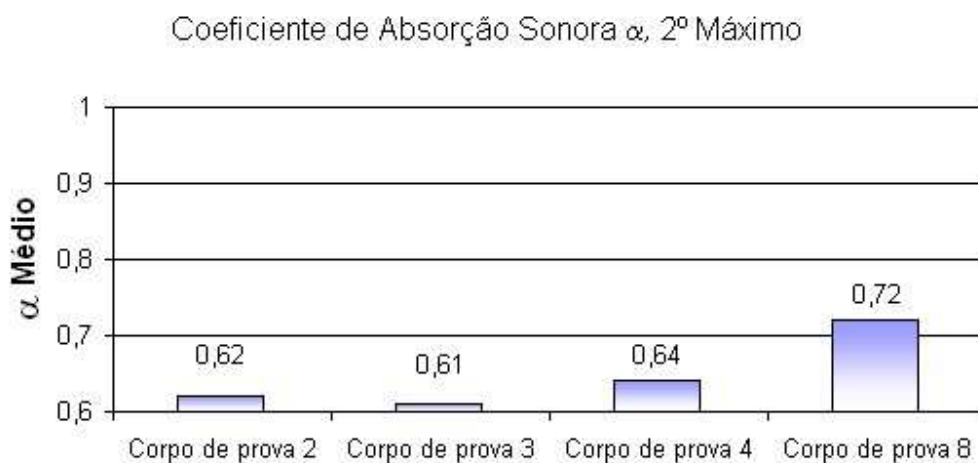


Figura 5.12 –Comparação do coeficiente de absorção sonora para os corpos de prova 2,3,4 e 8, segundo máximo de absorção.

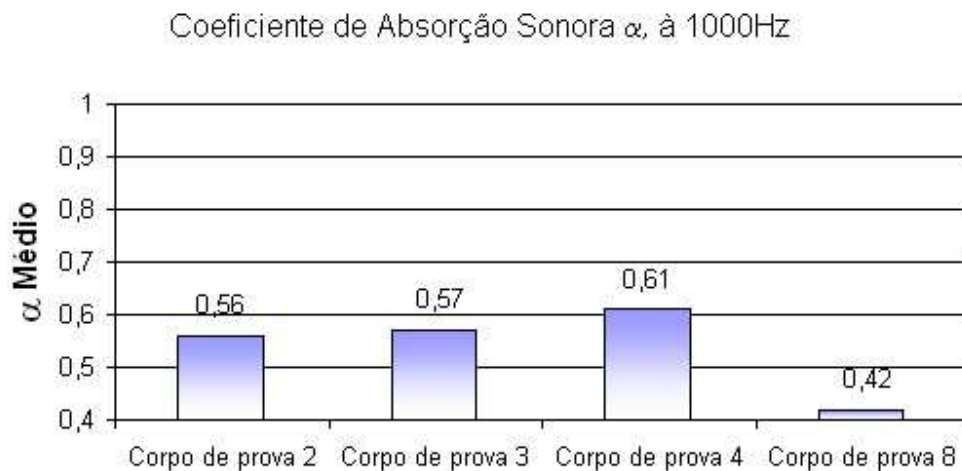


Figura 5.13 – Comparação do coeficiente de absorção sonora para as amostras 2,3,4 e 8, na faixa de frequência de 1000 Hz.

O deslocamento dos picos de absorção com relação à frequência de ocorrência dos mesmos, mostra que a posição destes picos é função da espessura da amostra, como descrito no item 5.2.

5.4 Comparações da permeabilidade dos corpos de prova

Os resultados referentes ao ensaio de permeabilidade para todas os corpos de prova com camada superficial drenante foram consideradas condizentes com o esperado, sendo os valores encontrados muito superiores ao mínimo exigido de 0,6 cm/s para camadas superficiais drenantes (AFNOR P 98-134, 1991). Comparando-se os valores de escoamento médio encontrados observou-se a tendência de que para os corpos de prova com diâmetro máximo maior (camada drenante) a velocidade de escoamento é maior (Figuras 5.14 e 5.15).

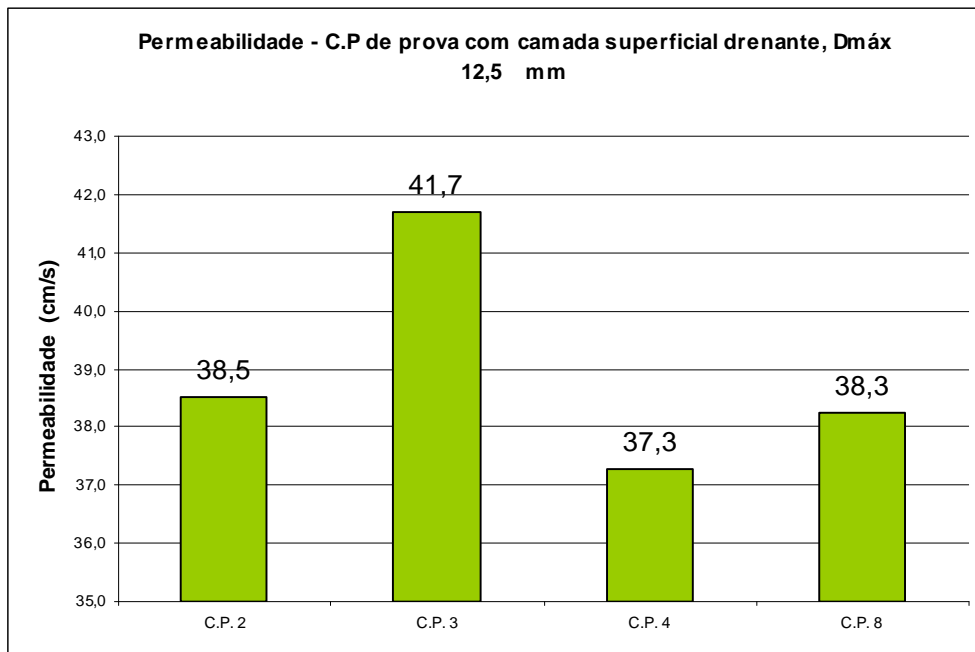


Figura 5.14 –Permeabilidade dos corpos de prova 2,3,4 e 8.

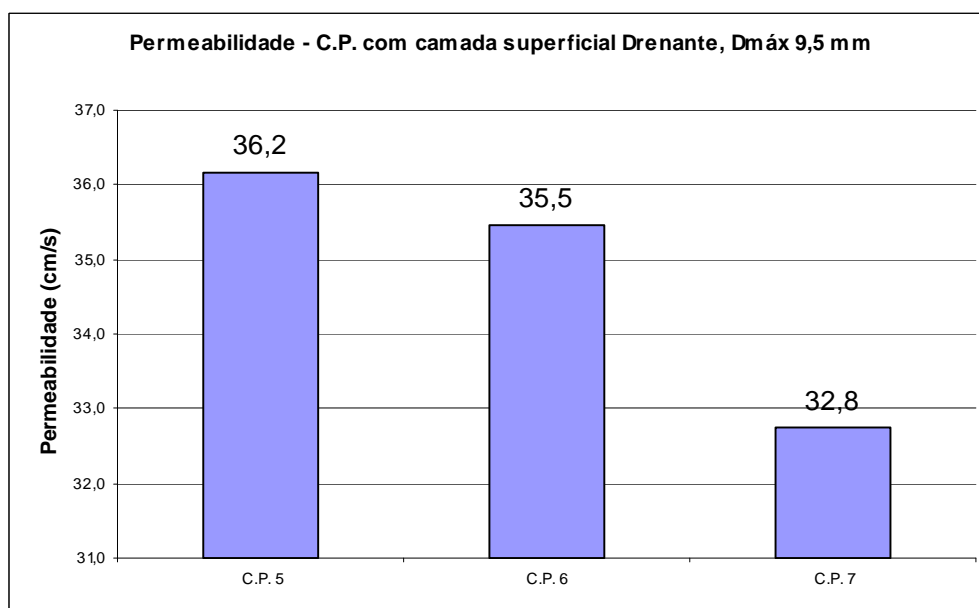


Figura 5.15 –Permeabilidade dos corpos de prova 5,6 e 7.

Dentro dos grupos de corpos de prova com mesmos tamanhos máximos de granulares na camada drenante, evidencia-se a diminuição do valor médio da permeabilidade para as camadas que possuíam em sua mistura, ligante com AMB, esta diminuição é perceptível tanto para a granulometria com diâmetro máximo 12,5 mm, como para a granulometria com diâmetro máximo 9,5 mm.

5.5. Análise conjunta dos resultados dos ensaios de absorção sonora e permeabilidade

A análise conjunta dos dados do ensaio de absorção sonora e permeabilidade permite observar, por exemplo, que a ordem da magnitude dos valores médios do coeficiente de absorção sonora e dos valores médios da permeabilidade são diferentes, dessa forma não se verifica relação direta entre os valores máximos e mínimos encontrados para estes ensaios (figuras 5.16 e 5.17).

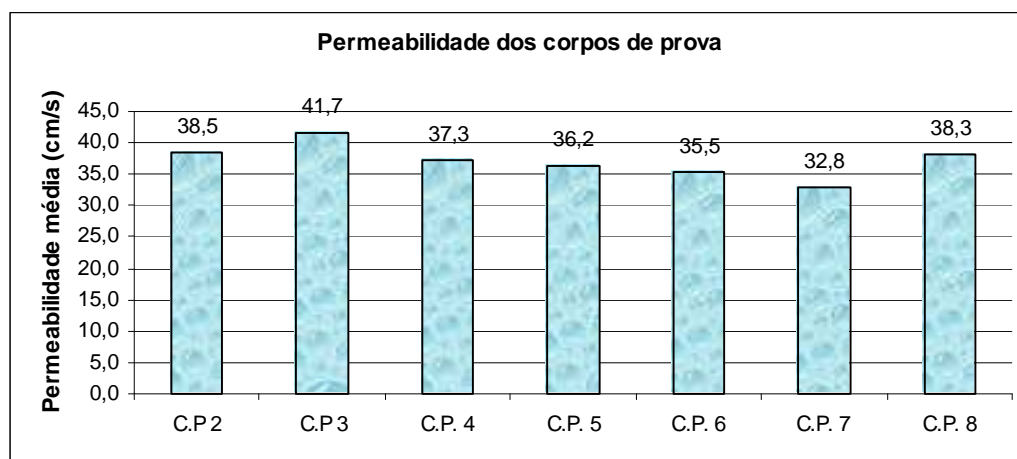


Figura 5.16 –Permeabilidade média de todos corpos de prova com camada superficial drenante.

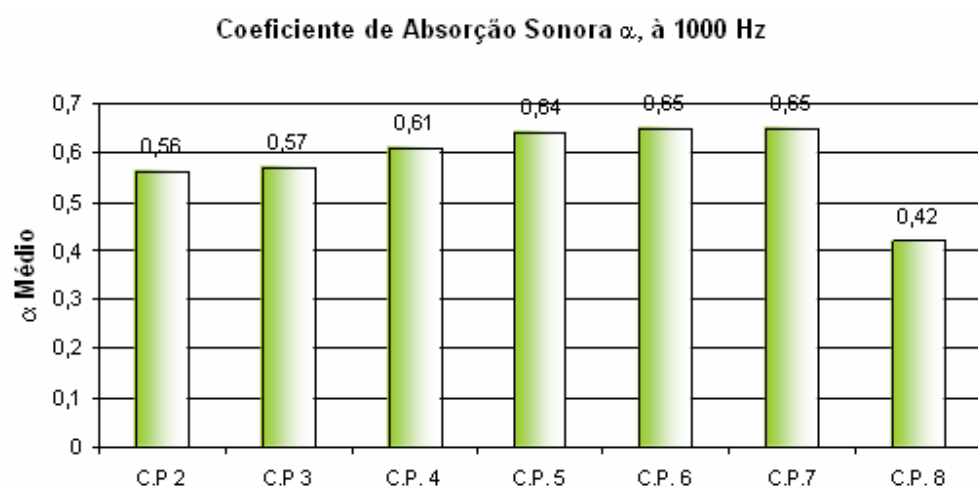


Figura 5.17 – Coeficiente de absorção sonora de todos corpos de prova com camada superficial drenante, na faixa de frequência de 1000Hz.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para todos os corpos de prova com camada superficial drenante, a absorção sonora foi superior à absorção sonora do corpo de prova com camada superficial densa, independentemente dos diâmetros máximos dos granulares utilizados e independentemente do tipo de CAP da mistura fabricada. As análises dos resultados do ensaio de absorção sonora nos corpos de prova permitem também as seguintes conclusões:

Os corpos de prova ensaiados, que possuíam em sua configuração camada superficial drenante com tamanhos máximos de agregados menores, obtiveram valores maiores quanto à absorção sonora, este comportamento ficou evidenciado para as frequências a partir de 1000 Hz. Assim, conclui-se que as misturas drenantes fabricadas com tamanhos máximos menores favorecem a absorção sonora.

Pela análise da absorção sonora entre corpos de prova com mesmos tamanhos máximos de agregados na camada superficial drenante, não se conseguiu verificar a diferenciação do comportamento acústico para os diferentes tipos de CAP nas misturas asfálticas. Isto leva a inferir que a espessura da película formada em torno das partículas dos agregados não exerce influência maior quando da verificação da absorção sonora. Assim, conclui-se que o parâmetro mais importante para a maximização da absorção sonora das camadas superficiais drenantes estudadas é a variação do tamanho máximo dos agregados.

A posição dos picos de absorção sonora encontrada nas curvas do espectro de absorção com a frequência é dependente da espessura dos corpos de prova ensaiados, como comprovado pela observação e comparação entre os dados de absorção sonora dos corpos de prova com camada dupla e corpo de prova com camada tripla.

Para a faixa de frequência de 1000 Hz observou-se para todos os corpos de prova com camada superficial drenante que os maiores valores encontrados para o coeficiente de absorção sonora foram daqueles corpos de prova com tamanho máximo do agregado menores, ou seja, também para esta faixa de frequência que é reportada na bibliografia como a que causa o maior incômodo

por parte de veículos automotores quando da emissão de ruído de rolagem, a diminuição do tamanho máximo dos agregados favorece a absorção sonora.

A partir dos resultados da impedância acústica normalizada, pode-se inferir que para valores menores de impedância a absorção sonora é maior. Este comportamento foi apresentado para todos os corpos de prova com camada superficial drenante e evidencio-se para valores de frequência mais baixos.

A permeabilidade dos corpos de prova com camada drenante é função do diâmetro máximo dos granulares desta camada. Para todos corpos de prova ensaiados, aqueles que possuíam em sua mistura agregados com diâmetro máximo maior, obtiveram valores de permeabilidade maiores.

Para os corpos de prova ensaiados a permeabilidade, aquelas que obtiveram os menores valores foram as que possuíam AMB, na composição da mistura drenante.

As conclusões quanto ao comportamento hidráulico e acústico dos corpos de prova foram feitas com análises baseadas em corpos de prova executadas em laboratório. Tanto o método de fabricação dos corpos de prova quanto a posterior execução dos ensaios, ocorreram com controle sobre os materiais e métodos de ensaio. Os corpos de prova com camada superficial drenante obtiveram um comportamento acústico muito bom com relação à absorção sonora, isto leva a crer que este tipo de material pode ser executado em campo quando se busca um controle mais efetivo dos níveis de emissão de ruídos produzidos por veículos automotores, principalmente quando da rolagem dos veículos nos pavimentos. Ressalta-se que esta propriedade de mitigação do ruído de rolagem pode ser observada em campo a velocidades a partir de 50 Km/h, onde a predominância da emissão do ruído externo total emitido por um veículo deve-se a rolagem dos pneus sobre a camada superficial do pavimento. Com relação à permeabilidade, o comportamento dos corpos de prova a percolação da água foi muito superior ao mínimo exigido para camadas superficiais drenantes, isto leva inferir que se pode recomendar a utilização deste tipo de mistura quando se busca maior segurança a rolagem em dias de chuva.

Recomenda-se a continuidade dos estudos sobre as características acústicas e hidráulicas das misturas drenantes, mas com o foco direcionado a composição de misturas e fabricação de corpos de prova com camadas simples ou dupla, que possuam tamanhos máximos dos granulares menores, visando com isso uma maximização da capacidade de absorção sonora da camada drenante. Além disso, deve-se buscar em trabalhos futuros, misturas granulométricas que favoreçam a absorção sonora na faixa de frequências entre 800 a 1000Hz, que é a mais problemática quando da emissão do ruído de rolagem.

REFERÊNCIAS

ABNT/NBR 7809/87 - Índice de Forma do Agregado Graúdo. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.

ABNT/NBR 12891/93 - Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall. Associação Brasileira de Normas Técnicas. São Paulo, SP, 1993.

ABNT/ NB 95 - Ruídos aceitáveis. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1996.

ABNT/NBR 7731 - Medição do ruído. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.

ABNT/NBR 10151- Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.

ABNT/NBR 10152 - Níveis de ruído para conforto acústico (NB 95). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1990.

ABBOT, P. e PHILLIPS, S. -Vehicle noise levels derived from the statistical pass-by method and road surface texture, NOISE-CON 96, Bellevue, Washington, USA, 1996.

ACI 325-88 – Texturing Concrete Pavements, reported by the American Concrete Institute Committee 325, 1998.

AIPCR – ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÉS DE LA ROUTE, XIX Congrès Mondial de la Route, Comité Technique des Caractéristiques de surface – Rapport, Marrakech, 1991.

AFNOR NF T 66-008 - Povoil Rigidifiant. Association Française de Normalisation, 1993.

AFNOR NF T 98-250-2 - Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques. Association Française de Normalisation, 1993.

AFNOR P 98-134 – Couches de Roulement: Béton Bitumineux Drainant, Association Française de Normalisation, 1991.

AGOSTINACCHIO, M., CUOMO, G. – Porous Concrete Road Pavements: Analysis of Noise Emissions and Applicative Implications from the Standpoint of both Active Safety and Freeze and Thaw Cycles Resistance, 3th International S.I.I.V. Congress, Bari, Itália, 2005.

ALFOSSO -LEDEE, F., et al - Tire/Road Noise Comparison of 2D and 3D Models for Horn Effect, Inter-Noise 2000, 2000.

ARENAS, J.P. et al. – Measurements of tire/ road noise and of acoustical properties of porous road surfaces, I.J.A and Vibration, vol. 10, n° 2, p.52-60, 2005.

BERENGIER, M. e F. ALFOSSO-LEDEE - State-Of-The-Art on Prediction and Control of the Road Traffic Noise in France, TRB paper 980691, Transportation Research Board, Washington D.C., Estados Unidos da América, 1998.

BONNOT, J. - French experiences of porous asphalts, European Conference on Porous Asphalts, Madrid, 1997.

BRITE EUARAM 3415 - Surface Properties of Concrete Road in Accordance with Traffic Safety and Reduction of Noise, State-of-the-art report, outubro de 1994.

BRUEL e KJAER - Basic frequency analyses of sound, disponível em <http://www.bksv.com/lectures/BA766911.pdf>, 1998.

BRUEL e KJAER - Environmental Noise, instructional booklet, disponível em <http://www.bksv.com/pdf/Environmental%20Noise%20Booklet.pdf>, 2000.

CFTR4 - Influence de la Couche de Roulement de la Chaussee sur le Bruit du Trafic Routier (Influence of the Road Surface on Road Traffic Noise), Comite Francais pour les Techniques Routieres, No. 4, Junho 2001.

CLAPP, T. G., A. C. EBERHARDT, e C. T. Kelly - Development and Validation of a Method for Approximating Road Surface Texture-Induced Contact Pressure in Tire-Pavement Interaction, Tire Science and Technology 16, pp 2-17, 1988.

CONTRE LE BRUIT- Renforcer les politiques de lutte contre le bruit, OCDE, Paris, 1986.

DESCORNET, G. - Noise classification of road pavements, Task 1: Technical background information. Draft report, junho de 2006.

DESCORNET, G. - SilVia – Sustainable road surfaces for traffic noise control. Presented at FEHRL Road Research Meeting, 14-17, Brussels. Acessado em www.fehrl.org, 10 de junho de 2005.

DESCORNET, G. - Traffic Noise and Road Surfaces: State-of-the-Art, Belgian Road Center, editor, 2000.

DESCORNET, G., F. FUCHS, e R. BUYS - Noise-Reducing Concrete Pavements, 5th International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. Purdue University, West Lafayette, IN, 1993.

DE GRAFF, D.F. - A Speed and Acceleration Limit in the Noise Type Approval of Vehicles Will Enable Silent Cars to Reveal Their Silence, INTERNOISE proceedings 2001.

DNER-ES 386/99 - Pavimentação - Pré Misturado a Quente com Asfalto Polímero - Camada Porosa de Atrito. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

DNER-ME 04/73 - Determinação da Viscosidade Saybolt-Furol de Materiais Betuminosos a Alta Temperatura. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1973.

DNER-ME 78/94 - Agregado Graúdo - Adesividade a Ligante Betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro (RJ), 1994.

DONOVAN, P. R. - Examination of Tire/Road Noise at Frequencies Above 630 Hertz, The 2002 International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Dearborn, MI, USA ,p.19-21, agosto de 2002.

DUMKE, M.P. – Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto borracha, dissertação de Mestrado, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

EJSMONT, J.A., - Tire/Road Noise Generating Mechanisms and Possible Ways of their Reduction, Proc. of the Second International Seminar TIRE/ROAD NOISE, TUG, Gdansk, Polonia, 25 de Junho de 1997.

EU - Future Noise Policy – European Commission Green Paper, DG XI, COM(96)540, European Commission, Brussels, Novembro, 1996.

FERNANDES, J.C.- Acústica e ruídos - Apostila do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - Campus de Bauru, 2002.

GERGES, S.N.Y. - Ruído : Fundamentos e Controle - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina - 1ª Edição, Florianópolis, 1992.

GERGES, S.N.Y. - Ruído e Vibrações Veiculares. - 1ª Edição, volume 1, Florianópolis , 2005.

HEERKENS, J. C. e G. G. VAN BOCHOVE - Twin-Lay a new Concept of Drainage Asphalt Concrete, Proceedings Euro-Noise 98, Munich, Alemanha.

ISO 10844 - Acoustics – Specification of Test Tracks for the Purpose of Measuring Noise Emitted by Road Vehicles, International Organisation for Standardization (ISO), Genebra, 1994.

ISO 11819-1 - Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: The Statistical Pass-By Method, International Organisation for Standardization (ISO), Genebra, 1997.

ISO/CD 11819-2 - Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise Part 2: The Close-Proximity Method, Draft Standard ISO/CD11819-2 (ISO), Genebra, Suíça, 2000.

JONES, WAYNE – Controlling Highway Noise at the source – Apresentação de Artigo na APWA- International Public Works and Exposition, Atlanta, Estados Unidos da América, setembro de 2004.

KUEMMEL, D. A., R. C. SONNTAG, J. A. CROVETTI, Y. BECKER, J. R. JAECKEL, e A. SATANOVSKY - Noise and Texture on PCC Pavements – Results of a Multi-State Study, Report Number WI/SPR-08-99. Wisconsin Department of Transportation, Madison WI, 2000.

KUIJIPERS, A. e VAN BLOKLAND, G.J.- Tyre/road noise models in the last two decades: a critical evaluation, Proceedings INTERNOISE 2001, agosto de 2001.

LÁO, VÂNIA L.E.S.T. – Estudo Comparativo do Desempenho Acústico de Diferentes Tipos de Revestimento dos Pavimentos, Tese de Mestrado, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

LELONG, J., MICHELET, R.- Effect of acceleration on vehicle noise emission, Acoustical Society of America and the European Acoustics Association, Proceedings of the Forum Acusticum 1999, Berlin, Março de 1999.

MARTINPORTUGUÉS C. et al – Efectos del ruido comunitario. Revista de Acústica, Vol. 34 nº 1 e 2, p. 31-39, 2003.

MASSARANI, P. M, Holanda, F.G. - Curso de Medição de Ruído em Áreas Habitadas, INMETRO, Xerém, RJ, Brasil, Novembro, 2003.

MEURER F., E. – Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes, dissertação de Mestrado, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

MOMM, L. –Pavimento drenante em concreto asfáltico, 2º Seminário Nacional de Modernas Técnicas Rodoviárias, Florianópolis, SC, 2000.

MOLISANI, L. – A Coupled Tire Structure-Acoustic Cavity Model, Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in Partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Virgínia, Estados Unidos da América, 2004.

MORGAN, P.A.,WATTS, G.R. - A novel approach to the acoustic characterisation of porous road surfaces, TRL Limited, Old Wokingham Road, Crowthorne, Berkshire RG45 6AU, Reino Unido, Janeiro de 2003.

NELSON, P. M., e S. PHILLIPS - Designing Porous Road Surfaces to Reduce Traffic Noise, Transportation Research Laboratory Annual Review 1994, Transportation Research Laboratory, Crow Thorne, Inglaterra, 1994.

NILSSON, R.- Innovative surfaces - Competitive and sustainable solutions (Work Package 4). Presented at FEHRL Road Research Meeting, 14-17 June 2004, Brussels. Acessado em www.fehrl.org, 10 de junho de 2005.

OLEK, J. –Fundamentals final report, SQDH The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways, Purdue University, 2004.

OLIVEIRA, C.G.M. – Estudo das propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante, dissertação de Mestrado, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília Distrito Federal, 2003.

PASQUET, A. – Campagne Nationale de Glissance 1967 en France, in Colloque International sur la Glissance et la Sécurité de la Circulation sur Routes Mouillées, Berlin, pp. 717-732, 1968.

PIARC - Report of the Technical Committee on Surface Characteristics, XIXth World Road Congress – Marrakesh, 1991.

PIMENTEL-SOUZA,F. – Efeitos da poluição sonora no sono e na saúde em geral – Ênfase Urbana, 1999, disponível em www.saudeetrabalho.com.br/t-ruído.htm, acessado em junho de 2005.

PUCHER E., LITZKA J, GIRARD J. W e HABERL J. Integration of powertrain and tyres with low-noise road surfaces. Proceedings of FISITA 2004 World Automotive Congress, Barcelona, Espanha, maio de 2004.

PROCEEDINGS 2003. ACSO - Environmental conditions at home and the workplace. Results of the survey in March 1991, Published by the Austrian Central Statistical Office, ACSO, Brochure 1,046, Viena 1992.

RANIERI, V. – The Development in the use of Porous Asphalts in Europe, 3th International S.I.I.V. Congress, Bari, Itália, 2005.

ROOVERS, M.S. - Studie naar de effecten van een regeling stille banden (Study of the effects of a regulation for silent tyres – in Dutch), M+P report M+P.KPMG.02.1.1rev0, dezembro de 2002.

ROOVERS, M.S.. - Tyre/Road Noise Measurements for Passenger Cars According to EU Directive 2001/43, M+P Noise and Vibration Consultants, Holanda, Janeiro de 2003.

ROOVERS M. S., MIODUSZEWSKI P., VAN BLOKLAND G.J. e EIJSMONT, J. - The SilVia round robin test on measurement devices for road surface acoustics. To be published in Proceedings of Inter-Noise 2004.

SAMEUR, A.- Modèle de contact pneumatique/chaussée pour la prevision du bruit de roulement, These Présentée pour l’obtention du diplôme de DOCTEUR DE L’ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, dezembro de 2004.

SANDBERG, U. e G. DESCORNET - Road Surface Influence on Tire/Road Noise, Proceedings Inter-Noise 80. Miami Florida, Estados Unidos da América, 1980.

SANDBERG, U. - Low Noise Road Surfaces- A-state-of-the-Art Review, Journal Acoustical Society Japão, 1999.

SANDBERG, U. - Tyre / Road Noise – Myths and Realities, INTERNOISE proceedings 2001.

SANDBERG, U e J. A. EJSFONT - The Influence of Tire Age and Wear on Tire/Road Noise Emission, 2002.

SILVIA (SILENTA VIA) - Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control – SilVia Deliverable 07: Recommendations on Specifications for Tyre and Vehicle Requirements”, TUW, março de 2004.

SQDH The Institute for Safe, Quiet and Durable Highways –FINAL REPORT: Field Evaluation of Porous Asphalt Pavement, 2004.

VAN BOCHOVE, G.- Porous Asphalt (Two-Layered) - Optimising and Testing, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona, 2000.

VON MEIER, A - Acoustically Optimized Porous Road Surfaces. Recent Experiences and New Developments, Proceedings Inter-Noise 88, Avignon, 1998.

VON MEIER, A - Thin Porous Surface Layers –Design Principles and Results Obtained, Proceedings Eurosymposium “The mitigation of Traffic Noise in Urban Areas”, LCPC, Nantes, França, 1992.

WAYSON - Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise, - NCHRP Synthesis 268, Transportation research board, 1998.